



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE GRADO

“SOFTWARE TOOL FOR
DESIGNING AERONAUTICAL
COMMUNICATION
SYSTEMS”

Autor: Miguel Bravo Arribas

Tutor: Francisco Javier González Serrano

Leganés, Junio de 2012

Título: SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING AERONAUTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Autor: Miguel Bravo Arribas

Director: Francisco Javier González Serrano

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A mi familia y seres queridos.

Resumen

“SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING AERONAUTICAL COMMUNICATION SYSTEMS” es una aplicación con fines didácticos y de diseño, realizada en Matlab, que presenta al usuario la posibilidad de diseñar y configurar un sistema de comunicaciones aeronáuticas a nivel de equipos y ver los resultados que este proporciona desde el punto de vista de las telecomunicaciones.

A través de una herramienta gráfica, el usuario podrá interactuar con el sistema pidiéndole o insertándole parámetros de diseño y configuración en función de las necesidades requeridas. La herramienta se compone básicamente de dos partes principales,

- Un **simulador** del sistema de comunicaciones aeronáutico.
- Una **herramienta de inserción y edición de equipos** de comunicaciones aeronáuticas.

A través del *simulador del sistema de comunicaciones aeronáutico*, se podrán definir un bloque transmisor y un bloque receptor, dando la posibilidad al usuario de elegir de entre una variada lista de equipos de comunicaciones aeronáuticas reales. Además del conjunto de equipos del sistema, se pueden configurar diversos parámetros de la comunicación definiendo: distancia entre transmisor y receptor, alturas a las que se encuentran, así como tecnología utilizada y tipos de datos que se quieren transmitir.

Con el conjunto de equipos definido y la configuración del sistema seleccionada, se podrán analizar los diversos parámetros de salida del sistema, pudiendo estudiar así si el conjunto de equipos seleccionado proporciona unos parámetros esperados/deseados o por el contrario los resultados obtenidos no son favorables y hay que modificar los equipos que forman el sistema, para así variar dichos resultados.

Además de la configuración del sistema de comunicaciones, se permite la posibilidad de introducir nuevos equipos y sus características al sistema, mediante una *herramienta de inserción y edición de equipos de comunicaciones aeronáuticas* que se ha diseñado exclusivamente para este proyecto. La introducción de los parámetros de los nuevos

equipos no será un problema, porque la herramienta se encarga de calcular los datos que faltan de las especificaciones proporcionadas en las hojas de características de los fabricantes, indistintamente del formato en el que vengan dadas.

Una vez introducidos todos los parámetros del equipo, la herramienta analiza los datos y proporcionan las especificaciones que no aparecen en las hojas o que han sido proporcionadas de forma indirecta.

El objetivo principal de este proyecto es el de brindar al usuario la experiencia de interactuar con un sistema de comunicaciones aeronáuticas, configurando una serie de parámetros del mismo, así como insertando y eligiendo los equipos de los que se va a formar el sistema, sin la molestia de tener que descifrar los distintos formatos especificados en las hojas de características de los equipos. A partir de estas configuraciones, se podrán observar los resultados que proporciona y así deducir qué partes del sistema hay que modificar para mejorar sus prestaciones, o qué equipos son más adecuados para un conjunto de parámetros deseado.

Palabras clave: Comunicaciones aeronáuticas, software, Matlab, telecomunicaciones, hojas de especificaciones.

Abstract

“SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING AERONAUTICAL COMMUNICATION SYSTEMS” is an application for teaching and designing purposes, carried out in Matlab, which presents the user the choice to configure and design an aeronautical communications system in an equipment layer and see the results that it provides from the standpoint of telecommunications.

Through a graphical tool, the user can interact with the system asking or inserting design parameters and settings based on the required needs. The tool consists basically of two main parts,

- A communications system **simulator** aircraft.
- A tool for inserting and editing aeronautical communications **equipment**.

Through the communications system simulator aircraft, it may define a block transmitter and receiver block, giving the user the possibility to choose from a varied list of actual aviation communications equipment. In addition to the set of system equipment, you can set various parameters defining communication: distance between transmitter and receiver, heights to which they are, technology used and types of data to be transmitted.

With the collection of the equipment defined and system configuration selected, the tool can analyze the various output parameters of the system, which can be studied and if the set of selected equipment provides parameters expected / desired or else the results are not favorable and need to modify the equipment making up the system in order to affect these results.

In addition to the configuration of the communication system, a possibility of introducing new equipment and features to the system is allowed, using an insertion tool and editing aeronautical communications equipment that is designed exclusively for this project. The introduction of the parameters of the new equipment will not be a problem, because the tool is responsible for calculating the missing data of the specifications provided in the data sheet of the manufacturer, regardless of the format in coming given.

When all the parameters of the computer have been introduced, the tool analyzes the data and provides specifications that do not appear on the sheets or those which have been provided indirectly.

The main aim of this project is to provide the user the experience of interacting with an aeronautical communications system, configuring a set of parameters of it, and inserting and selecting equipment that will form the system without hassle of having to decipher the various formats specified in the data sheets of equipment. From these settings, you can see the results it provides and to deduce which parts of the system must be modified to improve its performance, or which teams are best suited for a set of desired parameters.

Keywords: Aeronautical, software, Matlab, telecommunications, specifications sheets.

Índice general

PARTE I-INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

1. INFORMACIÓN PRELIMINAR	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Fases del desarrollo	3
1.4 Medios empleados	4
1.5 Estructura de la memoria.....	4
2. ESTADO DEL ARTE	7

PARTE II-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3. COMUNICACIONES AERONÁUTICAS.....	10
3.1 Estructura de equipos del sistema	11
3.2 Equipos.....	11
3.3 Bandas de frecuencias utilizadas	12
3.4 Tipos de enlaces de datos	13
3.5 Modulaciones	13
3.6 LOS y BLOS	14
3.7 Diagrama de radiación de las antenas.....	15
4. MEDIDAS DE CALIDAD Y PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES.....	18
4.1 MTBF	18
4.2 Ruido	19
4.2.1 Figura de ruido.....	19
4.2.2 Figura de ruido de elementos en serie.....	20
4.2.3 Ruido en la antena receptora.....	21
4.2.4 Temperatura de ruido total de un sistema receptor.....	21
4.3 Sensibilidad	22

4.4 SNR o S/N.....	23
4.5 [(S+N)/N]	24
4.6 SINAD	24
5. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS	26

PARTE III –SOLUCIÓN PROPUESTA

6. TOMA DE DECISIONES Y CONSIDERACIONES	29
7. CÁLCULOS REALIZADOS POR LA APLICACIÓN	31
7.1 Sistema Transmisor.....	31
7.1.1 Equipo transmisor. Potencia transmitida.....	31
7.1.2 Factor de corrección de la antena.....	33
7.1.3 PIRE.....	34
7.2 Canal.....	34
7.2.1 Pérdidas de propagación para HF (3-30 MHz)	35
7.2.2 Pérdidas de propagación para VHF (30-300 MHz).....	36
7.2.3 Pérdidas de propagación para UHF (300-3000MHz)	36
7.2.4 Pérdidas de propagación para SATCom (3-30 GHz).....	37
7.3 Sistema receptor	38
7.3.1 Factor de corrección de la antena.....	38
7.3.2 Potencia de señal recibida.....	38
7.3.1 Figura de ruido (F).....	39
7.3.2 Temperatura de ruido del sistema (Tsys)	40
7.3.3 Equipo receptor	43
7.4 Resultados del sistema	48
7.4.1 Medida de la SNR.....	48
7.4.2 Medida de la EbN0.....	49
7.4.3 Medida de la BER.....	50
7.4.1 Margen de enlace	50
8. GUI (INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO)	52
8.1 GUIDE.....	53
8.2 Pantalla principal de la aplicación.....	53
8.3 Simulador	54
8.3.1 LOS.....	57
8.3.2 Análisis y cálculo de parámetros.....	59
8.4 Equipos.....	60
8.4.1 Introducción de nuevo equipo	61
8.4.2 Modificación de equipos existentes	64
9. OBJETOS DE PROGRAMACIÓN DISEÑADOS	66
9.1 Estructura de objetos del sistema	66
9.2 Objeto “System”	67
9.3 Objeto “TxSystem”	67
9.4 Objeto “RxSystem”	68
9.5 Objeto “Transmitter”	68
9.6 Objeto “HPA”	68
9.7 Objeto “Duplexer”	69
9.8 Objeto “Wire”	69
10. FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN.....	70
10.1 Estructura de la aplicación.....	71
10.2 Funcionamiento del simulador.....	72
11. GUÍA DE USUARIO.....	73

PARTE IV-CONCLUSIONES E INFORMACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

12. CONCLUSIONES	75
13. FUTURAS LÍNEAS DE AMPLIACIÓN	76
14. PRESUPUESTO.....	77
14.1 Introducción.....	77
14.2 Fases del proyecto	78
14.3 Diagrama de GANNT	79
14.4 Presupuesto	80
15. GLOSARIO	84
16. BIBLIOGRAFÍA.....	86
17.1.1 Libros.....	86
17.1.2 Páginas o documentos electrónicos en la red.....	87
17. REFERENCIAS.....	89
18. ANEXOS	92
Anexo I. Arquitectura de referencia SATCom.....	93
Anexo II. Consideración sobre la pérdida de los conectores.....	94
Anexo II. Modulaciones analógicas	96
Anexo III. Modulaciones digitales	99
Anexo IV. Bandas de frecuencias	100
Anexo V. Tipos de enlaces de datos	103
Anexo VI. Atributos de los objetos programados	104

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de equipos de un sistema de comunicaciones aeronáutico.....	11
Figura 2. Ejemplo de uso de las distintas tecnologías de comunicaciones aeronáuticas[6]	13
Figura 3. Situación de LOS y BLOS.....	14
Figura 4. Distancia a la que se encuentra el horizonte	15
Figura 5. Patrón de radiación tridimensional [7].....	16
Figura 6. Patrones de radiación de azimut y elevación de un array de dipolos de VHF, fabricado por la compañía SINCLAIR [8].....	16
Figura 7. MTBF. Sistema de equipos en serie	19
Figura 8. Figura de ruido. Elementos en serie.....	20
Figura 9. Ruido en la antena receptora.....	21
Figura 10. Medida de la $(S+N)/N$ en AM [10].....	24
Figura 11. Hoja de especificaciones de un transceptor de Rockwell Collins [11].....	27
Figura 12. Hoja de especificaciones de un transceptor de Selex [12].....	27
Figura 13. Ángulo de elevación existente entre torre de control y avión.....	33
Figura 14. Curvas de pérdidas de propagación a 125 MHz y 95% de tiempo de servicio [13].....	36
Figura 15. Curvas de pérdidas de propagación a 1.2 GHz y 95% de tiempo de servicio [13].....	36
Figura 16. Curvas de pérdidas de propagación a 5.1 GHz y 95% de tiempo de servicio [13].....	37
Figura 17. Curvas de pérdidas de propagación a 15.5 GHz y 95% de tiempo de servicio[13].....	37
Figura 18. Cálculo del ángulo de elevación entre avión y torre de control actuando ésta como receptor.....	38
Figura 19. Potencia de señal recibida en el sistema receptor	39
Figura 20. Figura de ruido del sistema receptor	39
Figura 21. Temperatura de ruido del sistema receptor.....	40

Figura 22. Temperatura de ruido en la antena a frecuencias entre 10^4 a 10^8 . RecITU-R P.372 [14].....	41
Figura 23. Temperatura de ruido en la antena a frecuencias entre 10^8 a 10^{11} . RecITU-R P.372 [14].....	42
Figura 24. Medida de la SNR.....	48
Figura 25. Medida de la EbN0	49
Figura 26. GUIDE.....	53
Figura 27. Pantalla principal de la aplicación	54
Figura 28. Simulador.....	55
Figura 29. Simulador. Ejemplo de LOS en el simulador	58
Figura 30. Simulador. Ejemplo de BLOS en el simulador	58
Figura 31. Simulador. Botón “CALCULATE”.....	59
Figura 32. Siulador. Resultados favorables.....	59
Figura 33. Simulador. Resultados desfavorables	60
Figura 34. GUI de equipos	61
Figura 35. GUI de insertar nuevo dispositivo	61
Figura 36. GUI de equipo transceptor	62
Figura 37. Ruta de guardado y visualización de parámetros del equipo.....	63
Figura 38. Editar un equipo existente	64
Figura 39. Selección del equipo a editar	64
Figura 40. Interfaz de edición de parámetros del equipo seleccionado	65
Figura 41. Estructura de objetos del sistema.....	67
Figura 42. Estructura de la aplicación.....	71
Figura 43. <i>Proceso de interacción con el simulador</i>	72
Figura 44. Diagrama de GANNT.....	79
Figura 45. Arquitectura de referencia SATCOM [4]	93
Figura 46. Pérdidas de conector SMA [16].....	94
Figura 47. Pérdidas de conector tipo N [15]	94
Figura 48. Modulación AM [17]	96
Figura 49. Espectro de la Modulación SDB-AM [17]	97
Figura 50. Espectro de la Modulación SSB-AM [17].....	97
Figura 51. Curva de BER vs EbN0 para una modulación D8PSK [19].....	99
Figura 52. Curva de BER vs EbN0 para las modulaciones BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK, DQPSK, 4QAM, 16-QAM, 64-QAM [20]	99
Figura 53. Ejemplo de bandas de frecuencias aeronáuticas [21]	100
Figura 54.Refracción ionosférica de ondas de HF [21]	100
Figura 55.Refracción ionosférica de ondas de HF [22]	102

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas de frecuencias utilizadas en comunicaciones aeronáuticas	12
Tabla 2. Tipos de enlaces de datos aeronáuticos.....	13
Tabla 3. Tipos de modulaciones usadas en aeronáutica.....	14
Tabla 4. Equivalencia entre las medidas de calidad de un receptor	47
Tabla 5. Pérdidas por conectores en el sistema.....	95
Tabla 6. Atributos del objeto “System”	104
Tabla 7. Atributos el objeto “TxSystem”	105
Tabla 8. Atributos del objeto RxSystem	105
Tabla 9. Atributos del objeto “Transceiver”	108
Tabla 10. Atributos del objeto “Wire”	109
Tabla 11. Atributos del objeto “Duplexer”	110
Tabla 12. Atributos del objeto “HPA”	111
Tabla 13. Atributos del objeto “Antenna”	112

PARTE I

**INTRODUCCIÓN AL
PROYECTO**

Capítulo 1

Información preliminar

1.1 Introducción

Este proyecto trata del diseño y desarrollo de un software que permita diseñar sistemas de comunicaciones aeronáuticas a nivel de equipos, configurando los parámetros básicos del mismo y permitiendo al usuario escoger los equipos para conformar el sistema de comunicaciones.

El tema que pretende resolver es el de ayudar a estudiantes cuyos estudios tengan alguna materia relacionada con el campo de las telecomunicaciones en la aeronáutica. Grados de Telecomunicaciones, Grado en Ingeniería Aeroespacial, Postgrado (Master in AircraftSystemIntegration) MASI, resto de grados que tengan la posibilidad de escoger aeronáutica como asignatura optativa, así como a ingenieros ya formados que deseen diseñar un sistema de comunicaciones aeronáuticas sin tener que preocuparse del formato en el que le vengan dadas las especificaciones de los equipos.

La herramienta presenta al usuario, de forma gráfica mediante un simulador, la estructura de equipos que componen el sistema y un conjunto de parámetros de configuración del mismo, que se pueden variar. Mediante un conjunto de equipos definido y variando los parámetros del sistema, se pueden observar de forma dinámica los efectos que se producen en las variables que definen la calidad de las comunicaciones.

Con ello, se proporciona una visión global del conjunto del sistema y se permite la posibilidad de observar y aprender cómo fluctúan los resultados en función de las distintas variables de entrada. Es importante, porque de esta forma se pueden obtener resultados de manera rápida y sencilla, librando así al usuario de la necesidad de tener que realizar por sí mismo todos los cálculos para la obtención de las prestaciones del sistema, o incluso poder comprobar sus propios resultados, visualizando el sistema mediante la herramienta de simulación que se proporciona en la aplicación.

Además del simulador, el software proporciona una herramienta para la introducción de nuevos equipos de comunicaciones aeronáuticas. Mediante esta herramienta se permite la introducción de nuevos dispositivos al sistema incluyendo los datos extraídos de las hojas de características que proporciona el fabricante. Una vez introducidos, la herramienta analiza los datos y en función de los parámetros introducidos, se proporcionan las especificaciones que no se han dado en las hojas o que han sido proporcionadas de forma indirecta.

Actualmente existe un problema a la hora de trabajar con equipos aeronáuticos, que es que los distintos fabricantes de equipos aeronáuticos presentan las especificaciones en distintos formatos. Esta herramienta resuelve este problema y libra al usuario de tener que buscar compatibilidades entre parámetros. Una vez introducidos en el sistema los datos del equipo a insertar, la aplicación los analiza y en función del tipo de equipo, calcula los parámetros necesarios para mostrar los resultados en un formato común para poder ser utilizados posteriormente por el sistema.

1.2 Objetivos

El **objetivo principal** de este proyecto es el de brindar al usuario la posibilidad de diseñar un sistema de comunicaciones aeronáuticas, configurando diversos parámetros del mismo, eligiendo los equipos de los que se va a estar compuesto, así como dando la opción de introducir nuevos equipos sin tener que preocuparse del formato en el que vengan dadas las especificaciones.

En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Objetivos de diseño:
 - Analizar las especificaciones de las hojas de características proporcionadas por los fabricantes y extraer la información de una forma unificada para poderla usar en los cálculos posteriores.
 - Proporcionar información de los distintos parámetros de calidad usados en las comunicaciones aeronáuticas
 - Calcular los resultados que proporciona un conjunto de equipos de comunicaciones específico.
 - Permitir analizar los resultados obtenidos y variar los equipos del sistema en función de las necesidades.

- Objetivos didácticos:
 - Aprendizaje de la Estructura de los sistemas de comunicaciones usados en aeronáutica.
 - Análisis del funcionamiento de un sistema de comunicaciones aeronáutico.
 - Conocimientos sobre Normativa vigente referente a las comunicaciones aeronáuticas, haciendo especial énfasis en las tecnologías utilizadas, frecuencias destinadas a las mismas y pérdidas de trayecto.
 - Diseñar un sistema de comunicaciones aeronáuticas.
 - Cálculos de balance de enlace.
 - Manejar las distintas tecnologías usadas en las comunicaciones aeronáuticas.
 - Análisis de las prestaciones de equipos de comunicaciones aeronáuticos.
 - Familiarizar al usuario con los equipos aeronáuticos y sus distintas especificaciones.

1.3 Fases del desarrollo

- **Investigación preliminar.....7d**
 - Búsqueda de aplicaciones existentes relacionadas con el proyecto ... 3d
 - Definición del alcance y las limitaciones del proyecto 3d
 - Estimación del tiempo disponible para el desarrollo del proyecto 1d
- **Requerimientos del sistema.....7d**
 - Estudio de lo que el proyecto debe hacer y cómo. 7d
- **Recopilación de información.....42d**
 - Comunicaciones aeronáuticas 15d
 - Telecomunicaciones 5d
 - Equipos de comunicaciones utilizados..... 7d
 - Hojas de características de equipos aeronáuticos..... 10d
 - Programación en Matlab 10d
 - Orientación a objetos..... 5d
 - Interfaces gráficas. GUIDE..... 10d
- **Análisis del sistema12d**
 - Definición de la estructura del proyecto 8d
 - Simulador 4d
 - Equipos..... 4d
 - Estructura de los objetos de programación 2d
- **Diseño del sistema51d**
 - Programación de los objetos del sistema en MATLAB..... 15d
 - Cálculos de aumento de parámetros..... 15d
 - Programación de las funciones de cálculo en MATLAB..... 30d
 - Diseño de las interfaces gráficas de equipos en GUIDE..... 15d
 - Diseño de la interfaz gráfica del simulador en GUIDE 15d
 - Unión de las interfaces gráficas con las funciones de cálculo 5d
 - Insertar nuevos equipos..... 5d

CAPÍTULO 1: INFORMACIÓN PRELIMINAR

- **Pruebas** **8d**
 - Pruebas de funcionamiento del simulador 4d
 - Pruebas de equipos en el simulador 4d
 - Actualizaciones del sistema 4d
- **Documentación** **30d**

1.4 Medios empleados

Los medios empleados para la realización del proyecto, han sido principalmente los equipos informáticos, así como el software de Matlab disponibles ambos en la universidad Carlos III de Madrid. También ha sido de mucha ayuda el contenido bibliográfico disponible en la biblioteca de la universidad y diversa documentación extraída de Internet.

1.5 Estructura de la memoria

PARTE I – INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

Donde se detalla la información básica del proyecto

CAPÍTULO 1 – INFORMACIÓN PRELIMINAR

En este capítulo se presenta una breve introducción al proyecto, así como los objetivos que se quieren alcanzar con él y diversa información de su desarrollo.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se muestran las tecnologías existentes actualmente relacionadas con este proyecto y su línea de actuación.

PARTE II – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Donde se detalla la problemática con la que se enfrenta este proyecto y donde se explican las tecnologías con las que tiene que lidiar.

CAPÍTULO 3 - COMUNICACIONES AERONÁUTICAS

En este capítulo se abordan las tecnologías usadas, así como la estructura y equipos que componen un sistema de comunicaciones aeronáuticas. También se trata diversas consideraciones a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de este tipo como puede ser la curvatura de la Tierra.

CAPÍTULO 4 - MEDIDAS DE CALIDAD Y PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES

En este capítulo se explican las diversas medidas de calidad que representan a los equipos de comunicaciones en general y de la aeronáutica en particular. Además se presentan y desarrollan diversos parámetros a tener en cuenta en los cálculos de análisis y diseño.

CAPÍTULO 5 – HOJAS DE CARACTERÍSTICAS

En este capítulo se explica la problemática existente con las hojas de características de los fabricantes de equipo, en las cuales los parámetros vienen dados de diversas formas y no bajo un marco común. Se ponen varios ejemplos al respecto.

PARTE III – SOLUCIÓN PROPUESTA

Donde se presenta la solución diseñada y desarrollada para este proyecto. La solución se presenta en varias partes consecutivas y relacionadas unas con otras.

CAPÍTULO 6 – Toma de decisiones y consideraciones

Capítulo donde se explican las decisiones tomadas a la hora de abordar este proyecto y las consideraciones a tener en cuenta por la persona que quiera disfrutar de la aplicación.

CAPÍTULO 7 – Cálculos realizados por la aplicación

En este capítulo se detallan todos los cálculos realizados por la aplicación, tanto de análisis de parámetros, como de cálculos de balance de enlace o de especificaciones de equipos.

CAPÍTULO 8 – GUI (Interfaz Gráfica de Usuario)

En este capítulo presentan las partes principales de la interfaz gráfica de usuario diseñada y desarrollada para este proyecto. Debido a que la explicación completa de la GUI de la aplicación supondría un volumen excesivo de contenido, se ha desarrollado una “Guía de Usuario” disponible junto con los documentos de este proyecto, donde se explica con todo detalle la aplicación.

CAPÍTULO 9– Objetos de programación diseñados

En este capítulo se explica la metodología de la programación orientada a objetos que se ha utilizado a la hora de desarrollar el software. Se presentan y explican los objetos diseñados que funcionan en la aplicación.

CAPÍTULO 10 – Estructuras de funcionamiento de la aplicación

En este capítulo se explican de manera gráfica las distintas estructuras sobre las que funciona el software. Mediante diagramas de bloques se muestra el funcionamiento interno de la herramienta.

CAPÍTULO 11 – Guía de Usuario

En este capítulo se muestra la existencia de una guía de usuario completa e imprescindible para el uso de la aplicación.

PARTE IV – CONCLUSIONES E INFORMACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

Donde se detalla la información técnica del proyecto, así como las conclusiones y líneas de actuación futuras.

CAPÍTULO 1: INFORMACIÓN PRELIMINAR

CAPÍTULO 12 – Conclusiones

En este capítulo se detallan las conclusiones alcanzadas una vez desarrollado el proyecto.

CAPÍTULO 13 – Futuras líneas de ampliación

En este capítulo se detallan las posibles líneas de actuación futuras que pueden dar continuidad o complementar este proyecto.

CAPÍTULO 14 – Presupuesto

En este capítulo se detallan los costes del proyecto tanto de personales, como materiales, directos e indirectos y costes totales.

Capítulo 2

Estado del arte

Actualmente se encuentran en el mercado herramientas que permiten el diseño de sistemas de comunicaciones aeronáuticas, aunque hasta ahora ninguna puede decirse que trabaje a nivel de equipos como es el caso de este proyecto. A continuación se muestran algunas aplicaciones encontradas que guardan cierta relación.

Model-based design uses COTS tools for unmanned aerial systems development [1]

Esta herramienta permite el diseño de comunicaciones aeronáuticas de elementos no tripulados a nivel de sistema. Es una herramienta basada en Matlab y Simulink que permite a los ingenieros realizar cambios de diseño y observar los efectos que se producen en diversos subsistemas debido a esos cambios. Esto permite saber si el rendimiento global del sistema cumple con los requisitos y así poder realizar una optimización a la hora de diseñar a nivel de sistema antes de implementar el diseño en el software o desarrollo de un prototipo hardware.

EDA toolbox for VHF Data Link system simulation [2]

En esta herramienta se lleva a cabo una simulación no a nivel de equipo, sino de sistema. Entra en profundidad en los niveles más bajos de diseño, trabajando por ello a nivel de tramas y bloques de bits.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL arte

La aplicación, permite a los ingenieros de diseño de comunicaciones de radiofrecuencia, realizar simulaciones a nivel de sistema sobre componentes para la aeronáutica. Se definen varios bloques funcionales dentro de la capa física de enlace de datos VHF. La herramienta cubre las operaciones de banda base así como la como la modulación en radiofrecuencia, demodulación, etc. También permite la generación de señales y realización de pruebas en el receptor.

PARTE II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Capítulo 3

Comunicaciones aeronáuticas

El problema que se intenta resolver surge a raíz de las hojas de especificaciones, en las cuales debido a la gran cantidad de fabricantes de equipos de comunicaciones aeronáuticas (aunque se podría extrapolar a cualquier ámbito de equipos electrónicos), cada uno de ellos presenta los datos de una forma distinta, o respecto a unos parámetros de medida distintos.

Esta adversidad produce que, muchas veces, no se sepa con claridad las especificaciones que debes de tener en cuenta a la hora de utilizar un equipo o de qué forma deberías tenerlas en cuenta. El caso es que no existe un código común en el que se den las especificaciones y ello dificulta siempre la tarea.

De forma paralela a esto, no encontramos con la situación en la que no hay una herramienta didáctica, que permita estudiar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones aeronáuticas a nivel de equipos y que permita observar los resultados que este proporciona.

Un simple cambio en uno de los parámetros de entrada de un sistema como puede ser el cambio de un equipo debido a factores de diseño, puede producir la necesidad de tener que realizar una gran cantidad de cálculos para que este encaje en el sistema. Además de incompatibilidades que pueden surgir en el rediseño, se pierde una gran cantidad de tiempo en ello.

3.1 Estructura de equipos del sistema

La estructura de comunicaciones que se detalla a continuación, se basa en las arquitecturas de referencia de comunicaciones aeronáuticas encontradas en diversas fuentes en Internet de fabricantes de equipos de comunicaciones como European Organisation For The Safety Of Air Navigation [3] o L3 communications [4]

En la figura siguiente se muestra el esquema de bloques de equipos que forman el sistema completo.

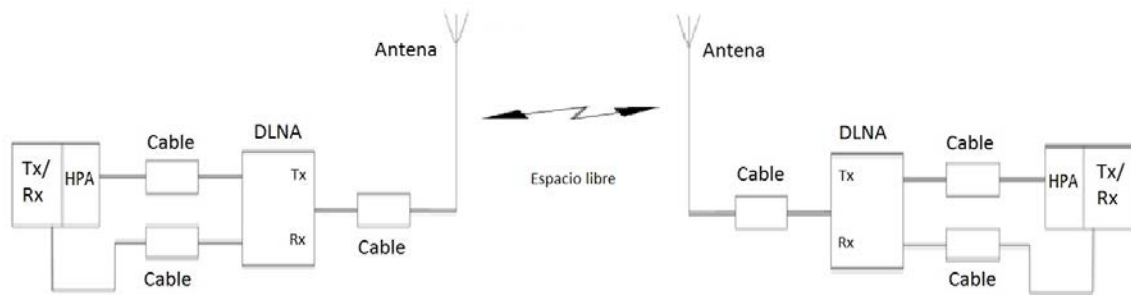


Figura 1. Estructura de equipos de un sistema de comunicaciones aeronáutico

3.2 Equipos

La información a continuación detallada se puede encontrar en [5]

Transceptores

Equipos que integran las funcionalidades de transmisor y receptor de información en la misma estructura hardware. La mayoría permiten la transmisión de voz y datos con distintas modulaciones. Las especificaciones de estos equipos suelen ser las que albergan una mayor cantidad de variantes.

Amplificadores de alta potencia (HPA)

Los amplificadores de alta potencia proporcionan un nivel de RF adecuado de señal, mediante un control automático, a la antena para mantener el balance de enlace. El HPA puede estar localizado cerca de la antena, para minimizar las pérdidas de energía de RF y consecuentemente para reducir la disipación térmica de la unidad HPA, o puede estar ubicado en el armario de equipamiento radio del vehículo aéreo para facilitar su mantenimiento e instalación.

Los HPA se caracterizan por tener un alto nivel de ganancia y baja figura de ruido. P.ej: $G = 25\text{dB}$, $F = 1.5\text{dB}$

Duplexores

Los duplexores se encargan de encaminar la señal que se quiere transmitir a la antena de transmisión del sistema de comunicaciones, así como de encaminar las señales recibidas desde la antena, al HPA.

Antenas

En el caso de las comunicaciones aeronáuticas las antenas se van a usar son antenas HGA (High Gain Antennas), o antenas de alta ganancia, las cuales son esenciales para comunicaciones de alta tasa de transmisión binaria tanto para servicios de voz como para servicios de datos. Las antenas embarcadas más comunes son las de montaje superior, ya que son más fáciles de instalar y mantener.

Cables

El cable típico usado en comunicaciones aeronáuticas es el cable coaxial, ya que además de poseer una fuerte inmunidad frente al ruido, es un cable de gran manejabilidad y manipulación, pudiendo adquirir cualquier forma y seguir cualquier recorrido dentro del vehículo aéreo.

Conectores

En comunicaciones aeronáuticas hay varios tipos de conectores típicos, los cuales se detallan en el anexo II.

3.3 Bandas de frecuencias utilizadas

NOMENCLATURA	Frecuencia mín.	Frecuencia máx.	Frecuencias aeronáuticas
HF (High Frequency)	3 MHz	30 MHz	3-28 MHz
VHF (Very High Frequency)	30 MHz	300 MHz	30-88 MHz 108 – 118 MHz 118-137MHz 137-156 MHz
UHF (Ultra High Frequency)	300 MHz	3 GHz	300-400 MHz 400-470 MHz 470-512 MHz
SHF (Super High Frequency)	3 GHz	30 GHz	5.1 GHz 9.4 GHz 15.5 GHz

Tabla 1. Bandas de frecuencias utilizadas en comunicaciones aeronáuticas

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del uso de las distintas bandas de frecuencias, por parte de un avión con su torre de control, a lo largo de un trayecto completo.

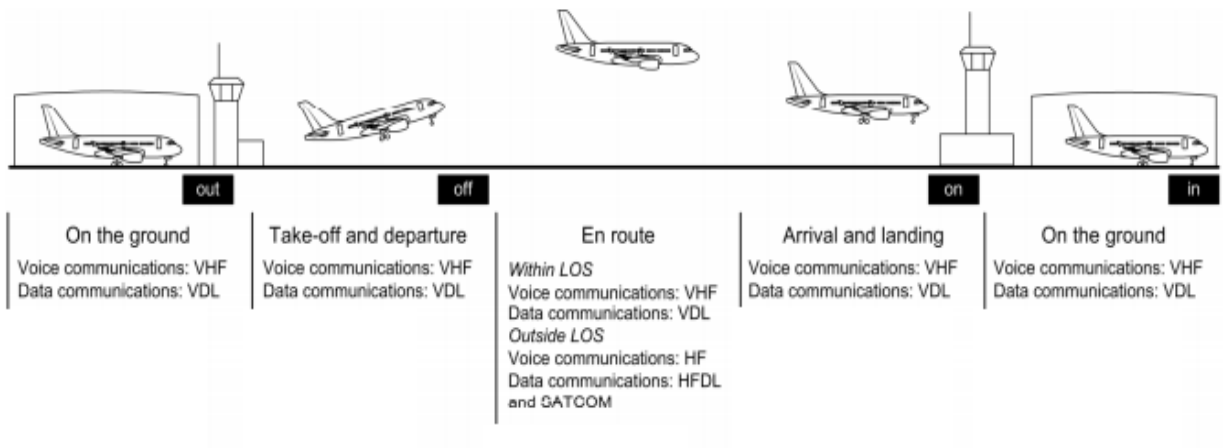


Figura 2. Ejemplo de uso de las distintas tecnologías de comunicaciones aeronáuticas[6]

3.4 Tipos de enlaces de datos

ENLACE	Acceso	Modulación	Régimen binario (Kbps)	Ancho de banda (KHz)
VDL – Modo 2	CSMA	D8PSK	31.5	25
VDL – Modo 3	TDMA	D8PSK	31.5	25
VDL – Modo 4	CSMA	GFSK	19.2	25
ACARS	-	AM-MSK	2.4	-

Tabla 2. Tipos de enlaces de datos aeronáuticos

3.5 Modulaciones

En este apartado se detallan los distintos tipos de modulaciones utilizadas en las comunicaciones aeronáuticas. A continuación se muestra una tabla resumen con las modulaciones utilizadas con mayor frecuencia por los equipos aeronáuticos.

TIPO DE MODULACIÓN	VOZ	DATOS
--------------------	-----	-------

ANALÓGICA	<ul style="list-style-type: none"> • SDB - AM • SSB - AM • FM 	-
DIGITAL	<ul style="list-style-type: none"> • AM – MSK (ACARS) 	<ul style="list-style-type: none"> • D8PSK (VDL-2) • GFSM (VDL-4) • MSK • $\pi/4$ DQPSK

Tabla 3. Tipos de modulaciones usadas en aeronáutica

Para un mayor detalle de las modulaciones analógicas, ver ANEXO II

Para un mayor detalle de las modulaciones analógicas, ver ANEXO III

3.6 LOS y BLOS

LOS (Line Of Sight): Existe vision directa entre el transmisor y el receptor

BLOS (BeyondLine Of Sight): No existe vision directa entre el transmisor y el receptor

Debido a la curvatura de la tierra, hay una distancia a la cual el transmisor y el receptor se encuentran fuera de visión directa. En este caso la atenuación sufrida por la señal que llega al receptor, debido a la propagación por el espacio, es mucho mayor que con visión directa.

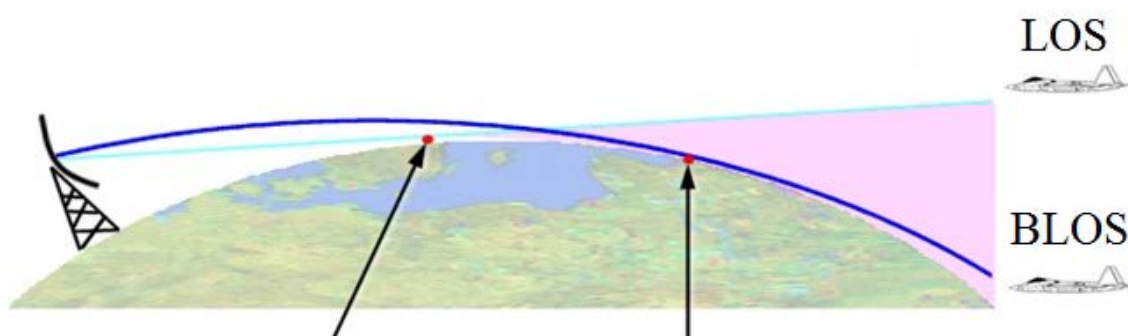


Figura 3. Situación de LOS y BLOS

Existe una fórmula que define la distancia aproximada a la que se encuentra el horizonte. Para ello hay que tener en cuenta la distancia longitudinal entre transmisor y receptor, así como la altura a la que se encuentran de la superficie terrestre.

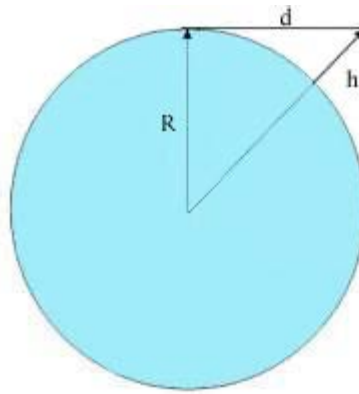


Figura 4. Distancia a la que se encuentra el horizonte

Donde:

d: Distancia del horizonte (Km)

R: Radio de la Tierra (Km)

h: Altura del elemento transmisor (Km)

k: Factor corrector debido a efectos atmosféricos y de reflexiones.

Habitualmente se asume k como 4/3 (condiciones medioambientales normales), aumentando así el rango de servicio en un 15%

Entonces queda:

$$d \approx 4.12 \sqrt{h}$$

h (m) y d (Km)

3.7 Diagrama de radiación de las antenas

Debido a la diferencia de alturas que existe entre los equipos transmisor y receptor en comunicaciones aeronáuticas, los fabricantes suelen proporcionar en las hojas de características de las antenas los diagramas de radiación tanto *azimutal* como de *elevación*

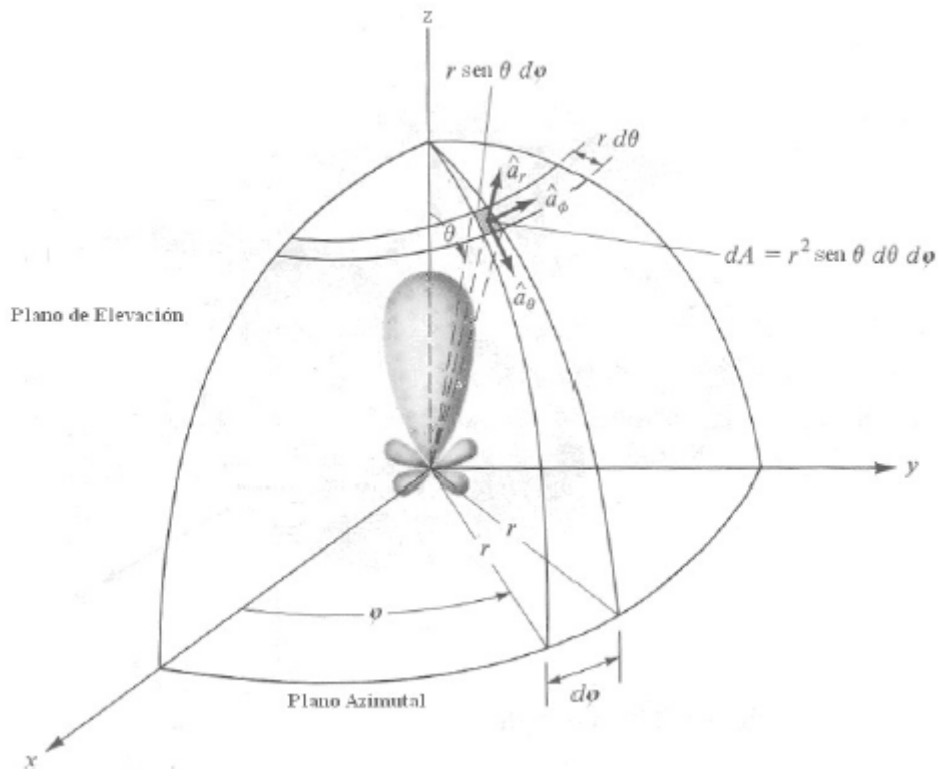


Figura 5. Patrón de radiación tridimensional [7]

Este patrón de radiación ha de ser tenido en cuenta, ya que produce una disminución de la potencia de la señal en según qué ángulo se encuentre el sistema receptor con respecto al transmisor.

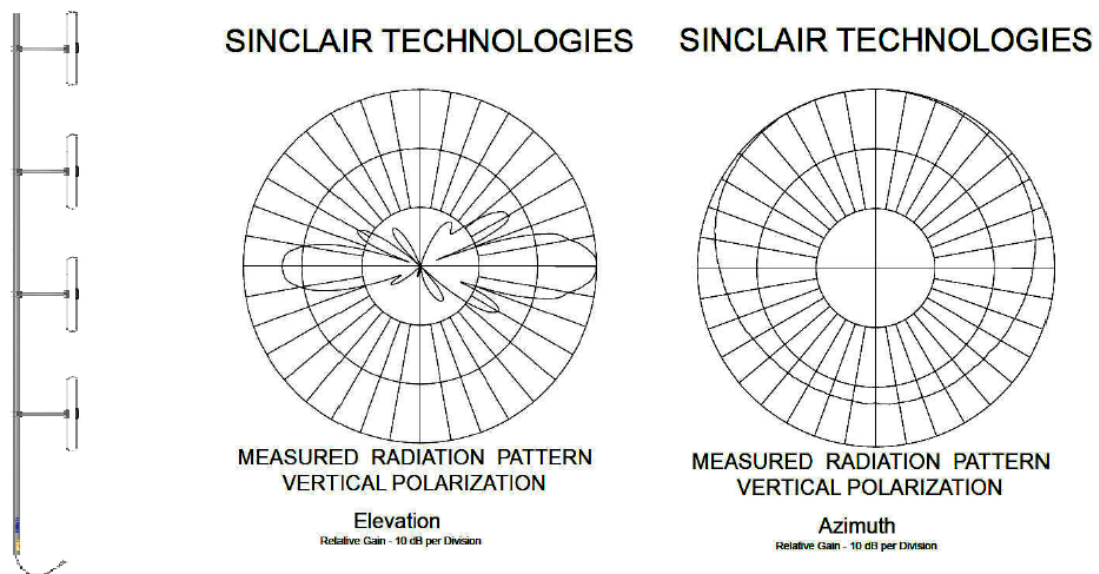


Figura 6. Patrones de radiación de azimuth y elevación de un array de dipolos de VHF, fabricado por la compañía SINCLAIR [8]

3.7 Diagrama de radiación de las antenas

En este ejemplo se ve como el array de antenas de SINCLAIR tiene un diagrama de radiación Azimutal casi omnidireccional y sin embargo el diagrama de radiación de elevación presenta 30 dB menos a 20° , y de 70° a 90° si nos fijamos en el primer cuadrante. Esto quiere decir que si nos encontramos en la situación en la que el avión se encuentra a 20° de la torre de control, o por encima de ella (70° - 120°), hay que tener en cuenta que esta antena produce una bajada de la señal tanto transmitida como recibida de 30 dB.

Capítulo 4

Medidas de calidad y parámetros de los sistemas de comunicaciones

4.1 MTBF

Tiempo medio entre fallas: explicación y estándares. [9]

MTBF (Mean Time BetweenFailure) es el tiempo medio de falla de un dispositivo o sistema. Constituye una medición fundamental de confiabilidad de un sistema. Este parámetro indica cual es la cantidad de tiempo (normalmente expresado en horas) en el cual el equipo va a funcionar correctamente sin producirse ningún fallo o error, a partir de ese tiempo, es probable que el equipo pueda fallar.

Este parámetro suele venir indicado por el fabricante del equipo en las hojas de características como MTBF o Reliability (Confiabilidad).

El cálculo del MTBF total de un sistema formado por varios equipos se calcula de la siguiente forma.

Sea un sistema de comunicaciones de la siguiente forma:

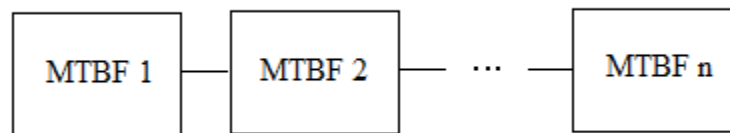


Figura 7. MTBF. Sistema de equipos en serie

Como se puede deducir, el MTBF del sistema vendrá marcado por el equipo que menor valor de MTBF tenga. Por ello el MTBF total se calcula como:

$$MTBF_{total} = \frac{1}{\frac{1}{MTBF_1} + \frac{1}{MTBF_2} + \dots + \frac{1}{MTBF_n}} \quad [1]$$

Donde:

MTBF1 = Tiempo Medio entre Fallas del equipo 1

MTBF2 = Tiempo Medio entre Fallas del equipo 2

MTBFn = Tiempo Medio entre Fallas del equipo 'n'

4.2 Ruido

4.2.1 Figura de ruido

Extraído de [1] Wayne Tomásí 'Sistemas de comunicaciones electrónicas' (Prentice Hall, 4ª Ed)

El factor de ruido (F) es una relación que indica cuánto se deteriora la relación de señal a ruido cuando una señal pasa por uno o varios circuitos. Concretamente es un cociente entre la potencia de señal de ruido a la entrada del elemento o sistema, y la potencia de señal de ruido a la salida:

$$F = \frac{Pn_{in}}{Pn_{out}} \quad [2]$$

F: Factor de ruido (Adimensional)

Pn_{in}: Potencia de señal de ruido a la entrada del elemento o sistema (W)

Pn_{out}: Potencia de señal de ruido a la salida del elemento o sistema (W)

Para definir el factor de ruido en decibelios, existe un parámetro llamado Figura de Ruido (NF) el cual se define como se indica a continuación:

$$NF (dB) = 10 \log \frac{P_{n_{in}}}{P_{n_{out}}} \quad [3]$$

NF: Figura de ruido (dB)

$P_{n_{in}}$: Potencia de señal de ruido a la entrada del elemento o sistema (W)

$P_{n_{out}}$: Potencia de señal de ruido a la salida del elemento o sistema (W)

4.2.2 Figura de ruido de elementos en serie

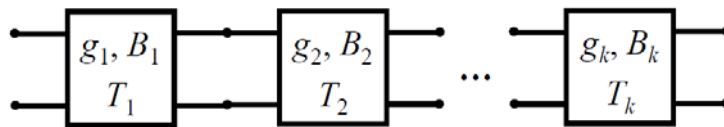


Figura 8. Figura de ruido. Elementos en serie

Sean:

g_k = ganancia del elemento 'k' (unidades naturales)

B_k = Ancho de banda del elemento 'k' (Hz)

T_k = Temperatura de ruido del elemento 'k' (K)

Tenemos que la temperatura de ruido total del sistema es:

$$T = T_1 + \frac{T_2}{g_1} + \dots + \frac{T_k}{g_1 g_2 \dots g_{k-1}} \quad [4]$$

T = Temperatura efectiva de ruido total del sistema 'n' (K)

Teniendo en cuenta que:

$$f_r = \frac{T_r}{T_0 - 1} \quad [5]$$

Obtenemos:

$$f = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \dots + \frac{f_{k-1}}{g_1 g_2 \dots g_{k-1}} \quad [6]$$

f : Factor de ruido total (unidades naturales)

f_k : Factor de ruido del elemento 'k' (unidades naturales)

En este tipo de configuraciones el primer elemento del sistema es fundamental, ya que va a decidir la figura de ruido final del conjunto.

A este elemento se le llama LNA (LownoiseAmplifier- Amplificador de bajo nivel de ruido) Este primer elemento ha de tener una baja figura de ruido, ej: 1.5dB y una alta ganancia, ej: 20dB

4.2.3 Ruido en la antena receptora

El ruido en la antena receptora se modela como una resistencia a temperatura T_a de forma que si la antena entrega una potencia de ruido entonces

$$Na = K * Ta * B \quad [7]$$

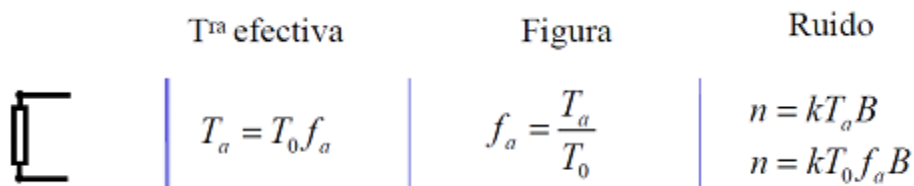


Figura 9. Ruido en la antena receptora

4.2.4 Temperatura de ruido total de un sistema receptor

La temperatura total de ruido en un sistema receptor completo es:

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{rec} \quad [8]$$

Donde:

T_{sys} = Temperatura de ruido equivalente en el sistema receptor completo (K)

T_{ant} : Temperatura de ruido equivalente en la antena receptora (K)

T_{rec} : Temperatura de ruido equivalente del sistema receptor (K)

Conociendo la figura de ruido del receptor, se puede calcular la T^a total mediante a siguiente relación:

$$T_{rec} = T_0 (F_{rec} - 1) \quad [9]$$

Donde:

T_{rec} = Temperatura de ruido equivalente en el sistema receptor (K) sin antena

T_0 : Temperatura de ruido de referencia (290 K)

F_{rec} : Figura de ruido del sistema receptor (unidades naturales) sin antena

4.3 Sensibilidad

La Sensibilidad es el nivel mínimo de potencia que se requiere en un receptor para poder analizar una señal correctamente y extraer su contenido completo. Condiciona por tanto el alcance y la potencia del transmisor necesaria para poder establecer una comunicación, de tal forma que, a igualdad de distancia y recibiendo una misma emisora, es posible que un receptor demodule la señal recibida correctamente y otro receptor menos sensible no.

La sensibilidad en comunicaciones se suele expresar en **dBm**, ya que la potencia que es necesario recibir para el correcto funcionamiento de la comunicación es de un nivel muy pequeño.

Hay que alcanzar el nivel de sensibilidad que pone el fabricante para poder obtener los valores de $S+N/N$ o SINAD indicados en las hojas de características. Estos niveles de $S+N/N$ o SINAD lo que hacen es garantizar que la calidad del audio recibido sea suficientemente buena como para poder ser inteligible. Por ejemplo en FM se necesitan unos niveles de SINAD de 12dB para recibir voz de calidad y 50dB para poder obtener niveles aceptables para recibir música de buena calidad.

A continuación se explican los parámetros que proporcionan los fabricantes de equipos de comunicaciones aeronáuticas en cuanto a la sensibilidad en receptores.

Sistema analógico:

$$S \text{ (dBm)} = SNR_{min} + F_s + 10\log B(\text{Hz}) - 174(\text{dBm/Hz}) \quad [10]$$

Sistema digital:

$$S \text{ (dBm)} = EbNo_{min} + F_s + 10\log Rb - 174(\text{dBm/Hz}) \quad [11]$$

4.4 SNR o S/N

SNR (SignaltoNoise Ratio) o S/N es la relación de potencias que existe entre la potencia de la señal entre la potencia de ruido en un mismo punto. Es difícil de medir de forma directa, debido a la imposibilidad de separar las dos cantidades. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{S}{N} = \frac{Ps}{Pn} \quad [12]$$

Donde:

Ps = Potencia de la señal (W)

Pn = Potencia de ruido (W)

Habitualmente esta relación se muestra en decibelios, con lo que se tiene que:

$$\frac{S}{N} \text{ (dB)} = 10 * \log \left(\frac{Ps}{Pn} \right) \quad [13]$$

En caso de tener los valores de voltajes y resistencias, la ecuación queda como:

$$\frac{S}{N} \text{ (dB)} = 20 * \log \left(\frac{Vs^2 / Rent}{Vn^2 / Rsal} \right) \quad [14]$$

Donde:

Rent = Resistencia de entrada ()

Rsal = Resistencia de salida ()

Vs = Voltaje de la señal (W)

Vn = Voltaje de ruido (W)

En caso de que las resistencias de entrada y salida sean las mismas, la ecuación queda como:

$$\frac{S}{N} (dB) = 20 * \log \left(\frac{V_s}{V_n} \right) \quad [15]$$

4.5 [(S+N)/N]

$S+N/N$ o relación señal más ruido a ruido, es un parámetro más comúnmente utilizado a la hora de medir las especificaciones de sensibilidad de un receptor, ya que es más fácil de obtener que la S/N al no tener que separar las componentes. Los fabricantes salen usar este parámetro para expresar la sensibilidad en receptores de **AM**.

$$\frac{S+N}{N} (dB) = \frac{P_s+P_n}{P_n} \quad [16]$$

P_s = Potencia de la señal (en dB) a la salida del receptor

P_n = Potencia de ruido (en dB) a la salida del receptor

Para calcular este parámetro, se hace una primera medida de la salida de audio del receptor con la señal modulada al 30% con un tono de 1KHz con lo que se obtiene la potencia de señal más ruido. Posteriormente se realiza una segunda medida interrumpiendo la modulación en el generador y dejando solo la portadora, con lo que obtiene la potencia de ruido.

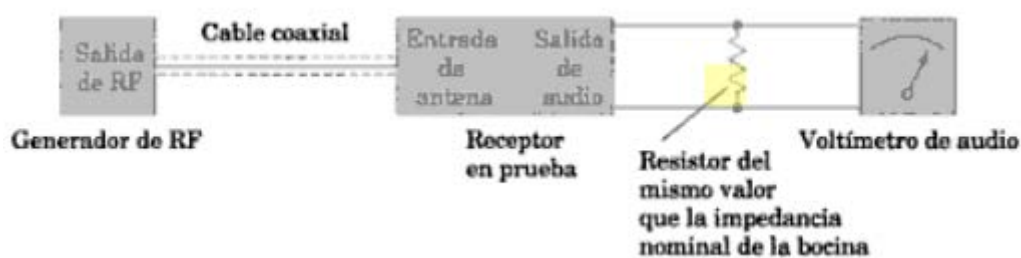


Figura 10. Medida de la $(S+N)/N$ en AM [10]

Si se supone que por lo menos se alcanza la potencia de la salida de audio mínimo, el nivel de portadora necesario para lograr $(S+N)/N$ de 10 dB es la sensibilidad; de otro modo, el nivel de portadora se incrementa hasta que se consigue la salida de audio especificada, y ese nivel de portadora es la sensibilidad.

4.6 SINAD

SINAD es la relación del nivel de la señal de potencia total (señal + ruido + distorsión) a potencia de la señal no deseada (ruido + distorsión). En consecuencia, cuanto mayor sea la cifra para SINAD, mejor será la calidad de la señal de audio.

La SINAD se expresa en decibelios (dB) y se puede obtener de la siguiente fórmula:

$$\boxed{\text{SINAD (dB)} = \frac{P_s + P_n + P_d}{P_n + P_d}} \quad [17]$$

Donde:

P_s = Potencia de la señal en dB

P_n = Potencia de ruido en dB

P_d = Potencia de la distorsión en dB

A diferencia de la S+N/N, la medición de SINAD es más ampliamente utilizada para la especificación de la sensibilidad de un receptor de radio **FM**.

Un valor de 12 dB es muy común para evaluar la sensibilidad de los receptores, ya que con este valor se alcanza una inteligibilidad aceptable de la voz. La señal de prueba se modula a 60% de desviación completa por un pulso de 1KH

Al igual que con la S+N/N, se realiza una primera medida de la salida de audio del receptor con la señal modulada con lo que se obtiene la potencia de señal más ruido más distorsión. Posteriormente se realiza una segunda medida interrumpiendo la modulación en el generador y dejando solo la portadora, con lo que obtiene la potencia de ruido más distorsión.


Capítulo 5

Hojas de características

Las hojas de características proporcionadas por los fabricantes vienen estructuradas de formas muy diversas y los parámetros indicados en ellas aún más. Normalmente dependiendo del equipo que se fabrica, las especificaciones vienen dadas de unas formas concretas. Esta diversidad de disposiciones, genera un gran problema a la hora de tener que decidir entre qué parámetros hay que usar para los cálculos o de qué forma hay que usarlos. Muchas veces los parámetros que se desean utilizar vienen ocultos o directamente no vienen especificados en las hojas.

Lo que se trata en este proyecto, es de aunar estas especificaciones en un marco común en el que se puedan analizar las hojas de características y recopilar todos los datos que se necesitan para el diseño del sistema de comunicaciones.

A continuación se presentan varios ejemplos de hojas de características de transceptores reales usados para comunicaciones aeronáuticas y de las distintas formas de expresar los parámetros.




VHF-2100 high speed Multi-mode Data Radio

Receiver characteristics		
Sensitivity	-107 dBm for 6 dB (s+n)/n	VOZ
	-98 dBm for 1×10^{-3} BER (Modes 2/3)*	DATOS

Figura 11. Hoja de especificaciones de un transceptor de Rockwell Collins [11]

Se puede observar que para una misma especificación, nos dan el parámetro de forma distinta cuando se refiere a voz y cuando se refiere a datos.

- La sensibilidad de **voz** la han calculado para un valor de 6dB de (S+N)/N
- La sensibilidad de **datos** viene calculada para un valor de BER de 10^{-3}



V/UHF AIRBORNE RADIO SYSTEM

Main Receiver	
Sensitivity(S+N)/N = 10 dB	0.6 μ V (FM) 1.5 μ V (AM).
AM modulation index	80% to 100%
Audio output distortion	5%
Spurious rejection	70 dB

Figura 12. Hoja de especificaciones de un transceptor de Selex [12]

En este caso, para una misma especificación, nos dan el parámetro de forma distinta, dependiendo de la modulación utilizada.

- **AM** Con 1.5 μ V se alcanza una (S+N/N) de 10 dB. Con una 'm' de 0.8 a 1
- **FM** Con 0.6 μ V se alcanza una (S+N/N) de 10 dB

PARTE III –SOLUCIÓN PROPUESTA

Capítulo 6

Toma de decisiones y consideraciones

TOMA DE DECISIONES:

El problema principal a la hora de abordar este proyecto, se centra en primer lugar en la necesidad de selección del **lenguaje de programación** adecuado para ello. Esto es de vital importancia, porque un lenguaje que no encaje con las características del proyecto, puede dificultar mucho su desarrollo.

Qué **metodología** usar a la hora de **programar** el **software**, es decir, es necesario plantearse si usar o no una interfaz gráfica para la interacción con la aplicación o si directamente se van a introducir los datos por línea de comandos y obtener los resultados del mismo modo. También se ha de tener en cuenta si el sistema de comunicaciones se va a programar de una forma orientada a objetos o de otra forma.

Con respecto a los **conocimientos necesarios** para llevar a cabo este proyecto, es muy importante tener en cuenta que aunque se disponga de los conocimientos necesarios para diseñar un sistema de comunicaciones, en este proyecto se integran dos ramas de conocimiento distintas como son las telecomunicaciones y la aviación. Por ello es necesario profundizar en ambos temas, para adquirir los conocimientos necesarios para entender el funcionamiento y características de los sistemas de comunicaciones usados en la aeronáutica.

En este proyecto se trata de proporcionar al usuario un medio para la **introducción de equipos de comunicaciones** reales usados en aeronáutica, por lo que hay que desarrollar un método para que esto se pueda realizar de forma fácil e intuitiva.

Por último y no por ello menos importante, para la realización de este proyecto, hay que tratar con **hojas de características** de equipos de comunicaciones reales usados en la aeronáutica, lo que implica que dependiendo del fabricante vamos a encontrar los datos indicados de una forma u otra.

Lenguaje de programación →MATLAB®

Habiendo analizado diversos lenguajes de programación que pudieran encajar con este proyecto, debido a la orientación hacia la ingeniería que se le quiere dar al mismo, se ha elegido el uso de MATLAB®

MATLAB® es un software matemático programado en C y Java, con lo que aúna las características de ambos lenguajes convirtiéndolo así en un software muy potente. En el mundo de la ingeniería es un lenguaje muy utilizado, con lo que encaja perfectamente en el ámbito de este proyecto tanto en la actualidad, como para su uso futuro.

Además de esto, otra de las ventajas de MATLAB®, es que es un lenguaje multiplataforma con lo que no van a existir problemas a la hora de usarlo en un sistema operativo (SO) o en otro. Permite la creación de interfaces de usuario y la interacción con otros programas realizados en otros lenguajes de programación.

MATLAB® proporciona dos herramientas muy útiles como son Simulink® que es una plataforma de simulación y GUIDE® que es un editor de interfaces gráficas de usuario (GUI)

Estilo programación →Programación orientada a objetos + GUI

Después de estudiar diversas posibilidades, la opción que se ha elegido ha sido la de realizar una programación orientada a objetos y juntar esto con una interfaz gráfica de usuario intuitiva.

La programación orientada a objetos (POO) va a permitir tener distribuido el sistema de comunicaciones en las diferentes partes de las que se compone de una forma organizada y clara. Cada equipo de comunicaciones que forma parte del sistema va a ser un objeto con sus atributos previamente definidos como plantilla al igual que las diferentes partes del sistema de comunicaciones. En el capítulo 9, se detalla la estructura del sistema de comunicaciones y su distribución en forma de objetos.

CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA:

- Debido a que la aplicación funciona bajo el GUIDE de MATLAB, es necesario que sea ejecutada en una versión de MATLAB R8 o superior, ya que de otra forma puede haber problemas de librerías e implementaciones que no existan.

Capítulo 7

Cálculos realizados por la aplicación

7.1 Sistema Transmisor

7.1.1 Equipo transmisor. Potencia transmitida

Habitualmente los fabricantes proporcionan los datos de potencia de transmisión de los transceptores directamente, pero cuando el equipo trabaja en HF y la modulación que se usa para transmitir es AM, hay que tener en cuenta 2 consideraciones:

7.1.1.1 Potencia de portadora

En este caso el fabricante nos proporciona la potencia de la portadora en vez de la potencia de transmisión de la señal, por lo que hay que hacer el siguiente cálculo:

<http://www.slideshare.net/aljimene/parametros-de-am-presentation>

$$P_{tx} = P_{port} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad [18]$$

Donde:

P_{tx} = potencia transmitida de la señal modulada en AM (W)

P_{port} = potencia de la señal portadora (W)

m = índice de modulación (unidades naturales)

$$m = \frac{A_{mod}}{A_{port}} \quad , \quad 0 < m \leq 1 \quad [19]$$

Donde:

A_{mod} = Amplitud de la señal moduladora

A_{port} = Amplitud de la señal portadora

7.1.1.1 PEP (Potencia de pico de la envolvente)

PEP, es la potencia de pico que puede alcanzar una señal modulada en AM cuando estamos trabajando con un índice de modulación del 100% [] R. Dean Straw, ed. *ARRL Handbook For Radio Amateurs*. Newington, Connecticut: American Radio Relay League, 1999, p. 6.7.

Habitualmente los fabricantes proporcionan este valor en las hojas de características cuando son equipos de HF. En vez de referir el valor de la potencia de transmisión de la portadora o de la señal modulada, proporcionan el valor en términos de PEP. Para calcular el valor de la potencia de la portadora, hay que utilizar la siguiente fórmula:

$$P_{port} = \frac{PEP}{4} \quad [20]$$

Donde:

P_{port} : Potencia de la portadora de la señal (W)

PEP: Potencia de pico de la portadora (W)

Una vez tenemos el valor de la portadora, calculamos el de la señal como se muestra en el apartado 5.1.1.1

7.1.2 Factor de corrección de la antena

Debido a la problemática que existe en cuanto al ángulo de elevación explicado en el apartado 3.7 (Diagrama de radiación de las antenas), se analiza el ángulo de elevación al que se encuentra el avión de la torre de control mediante la distancia longitudinal y la diferencia de alturas entre ambos.

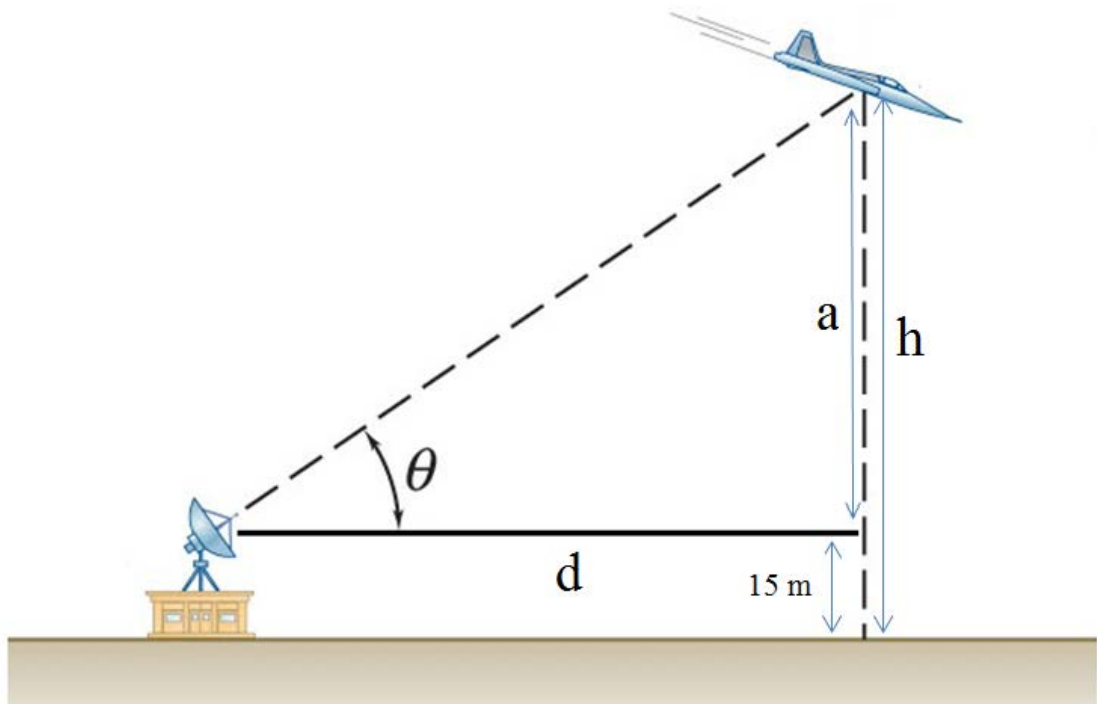


Figura 13. Ángulo de elevación existente entre torre de control y avión

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a}{d} \right) \quad [21]$$

Donde:

- θ : ángulo entre la torre de control y el avión (°)
- d : distancia longitudinal entre la torre de control y el avión (m)
- h : altura del avión con respecto a la superficie terrestre (m)
- a : diferencia de alturas entre el avión y la torre de control (m)

Una vez hallado el ángulo, hay que irse al diagrama de radiación de elevación proporcionado por el fabricante y aplicar el factor corrector correspondiente. Este factor

de corrección se inserta en el cálculo de balance de enlace como una pérdida adicional, en este caso concreta para el cálculo de la PIRE.

7.1.3 PIRE

Este parámetro indica la cantidad de potencia, medida en decibelios, que sale del sistema transmisor después de tener en cuenta todos los elementos.

$$PIRE (dBW) = 10\log(P_{Tx}) + G_{HPA} + G_{Dup} + G_{Ant} - FC_{Ant} - L_{dup} - L_{cable} - L_{con} \quad [22]$$

Donde:

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (dBW)
PTx: Potencia de transmisión del equipo transmisor (W)
GHPA: Ganancia del HPA (dB)
GDup: Ganancia del duplexor (dB)
GAnt: Ganancia de la antena (dB)
LDup: Pérdidas introducidas por el duplexor (dB)
Lcable: Pérdidas introducidas por los cables (dB)
Lcon: Pérdidas introducidas por los conectores (dB)
FC_{Ant}: Factor de corrección de la antena transmisora (dB)

7.2 Canal

Debido a que se está tratando con un sistema de comunicaciones aeronáuticas, para trabajar con las pérdidas de potencia de las señales en el espacio libre de la forma más exacta posible, hay que tener en cuenta además de las distancias longitudinales entre el sistema transmisor y receptor, la distancia de alturas entre los mismos, reflexiones atmosféricas, efectos climatológicos, etc.

Teniendo en cuenta todo ello, según la recomendación, **Rec. UIT-R P.528-2** [13] expedida por la Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT (Universal Telecommunications Union), se pueden extraer un conjunto de curvas de pérdidas en las que se reflejan todos los factores anteriormente citados. Dichas curvas tienen el título de

“CURVAS DE PROPAGACIÓN PARA LOS SERVICIOS MÓVIL AERONÁUTICO Y DE RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA QUE UTILIZAN LAS BANDAS DE ONDAS MÉTRICAS, DECIMÉTRICAS Y CENTIMÉTRICAS”

Los conjuntos de curvas se dividen en la frecuencia en la que se está operando y el grado de disponibilidad al que se quiere trabajar.

En este caso debido a que el servicio aeronáutico cumple a menudo una función de protección de la vida humana y necesita, por lo tanto, un grado de disponibilidad mayor que otros muchos servicios, que para obtener un servicio más fiable, debe utilizarse una disponibilidad en el tiempo de 0,95

A continuación se presentan las distintas curvas usadas en este proyecto. Si se quiere más información sobre el método de cálculo de las mismas, todo ello se encuentra disponible en la citada recomendación anterior.

7.2.1 Pérdidas de propagación para HF (3-30 MHz)

Siendo estas frecuencias de un valor no muy alto en cuanto a las pérdidas se refiere, la comunicación en esta banda no provoca unos picos de atenuación muy destacables, por lo que las pérdidas de enlace varían de forma casi lineal y proporcional a la distancia de separación entre las partes del sistema.

Por ello se puede realizar una aproximación en la cual se toma como curva de referencia para las pérdidas de enlace, la fórmula de Friis que define las pérdidas básicas de transmisión como se indica a continuación:

$$P_r(d) = P_t G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad [23]$$

d: distancia en km entre emisor y receptor (m)

P_T : Potencia emitida (W)

P_R : Potencia requerida (W)

G_T : Ganancia de transmisión (unidades naturales)

G_{RX} : Ganancia de recepción (unidades naturales)

λ : longitud de onda (m)

Quedando la ecuación que se muestra a continuación:

$$PL (dB) = (32.44 + 20 \log d [Km] + 20 \log f [MHz]) \quad [24]$$

7.2.2 Pérdidas de propagación para VHF (30-300 MHz)

Se ha seleccionado el grupo de curvas que corresponden a unas pérdidas de enlace a 125 MHz de funcionamiento, ya que son las que más se adecúan a esta banda de frecuencias.

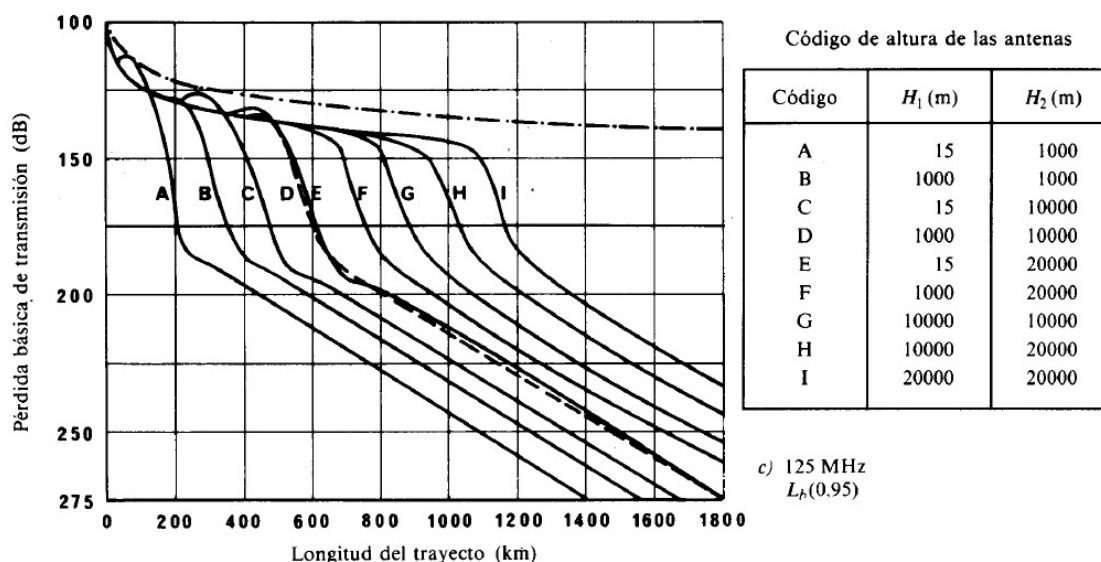


Figura 14. Curvas de pérdidas de propagación a 125 MHz y 95% de tiempo de servicio [13]

7.2.3 Pérdidas de propagación para UHF (300-3000MHz)

Se ha seleccionado el grupo de curvas que corresponden a unas pérdidas de enlace a 1200 MHz de funcionamiento, ya que son las que más se adecúan a esta banda de frecuencias.

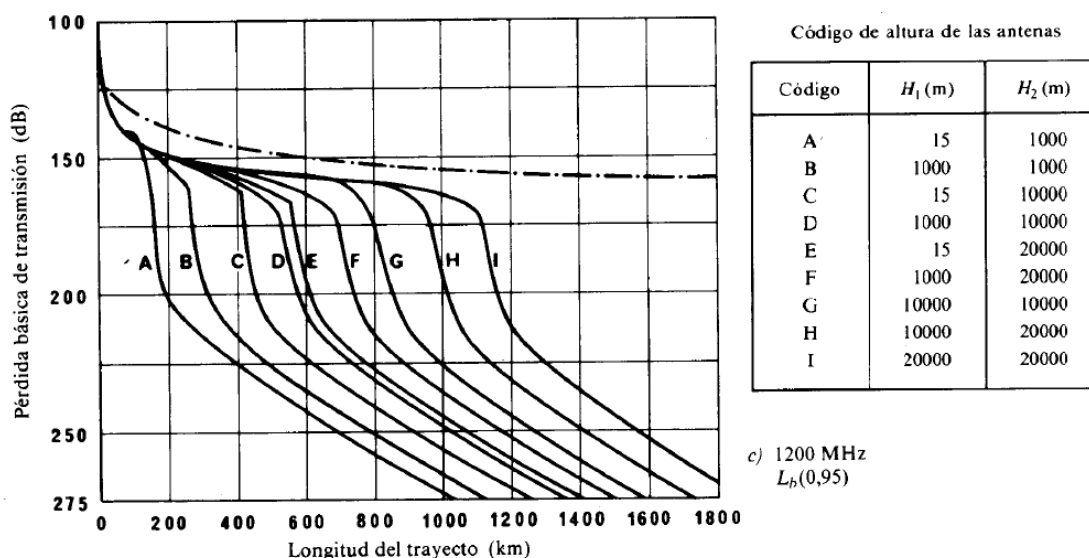


Figura 15. Curvas de pérdidas de propagación a 1.2 GHz y 95% de tiempo de servicio [13]

7.2.4 Pérdidas de propagación para SATCom (3-30 GHz)

Se han seleccionado dos grupos de curvas, la de 5.1 GHz y la de 15GHz siendo ellas las más representativas de la banda de frecuencias utilizadas en SATCom en la aeronáutica.

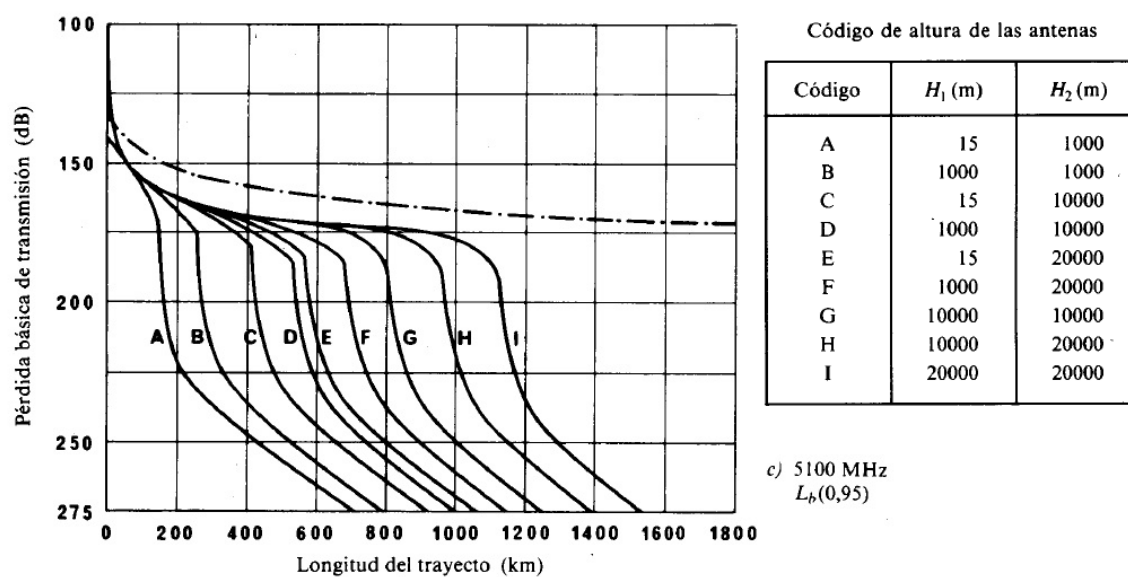


Figura 16. Curvas de pérdidas de propagación a 5.1 GHz y 95% de tiempo de servicio [13]

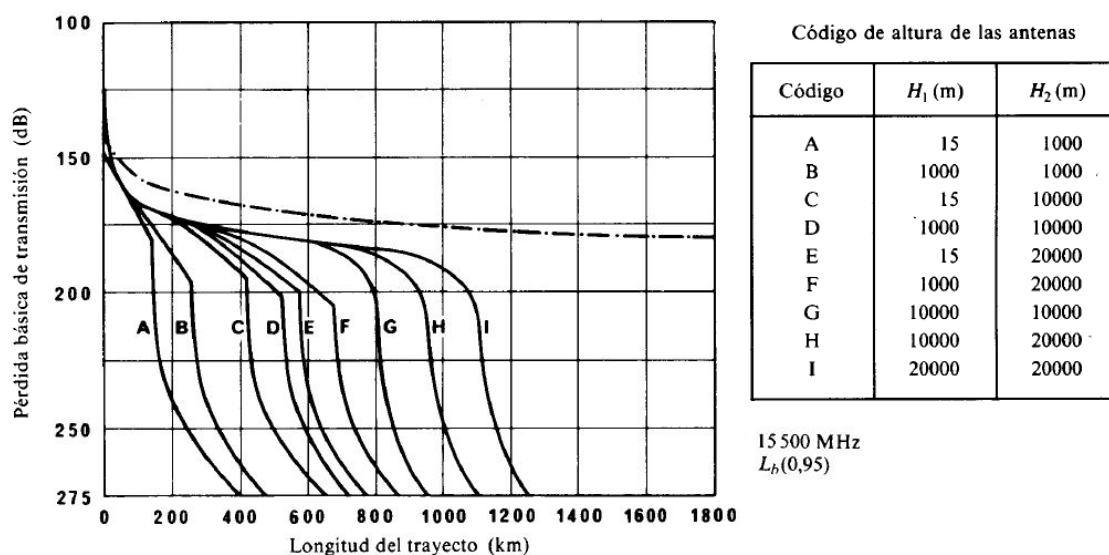


Figura 17. Curvas de pérdidas de propagación a 15.5 GHz y 95% de tiempo de servicio[13]

7.3 Sistema receptor

7.3.1 Factor de corrección de la antena

Al igual que en el caso del cálculo de la PIRE en el transmisor, en el sistema receptor hay que tener en cuenta que si el que transmite es el avión y el que recibe es la torre de control, hay que aplicar el factor corrector debido al ángulo de elevación formado entre torre y avión.

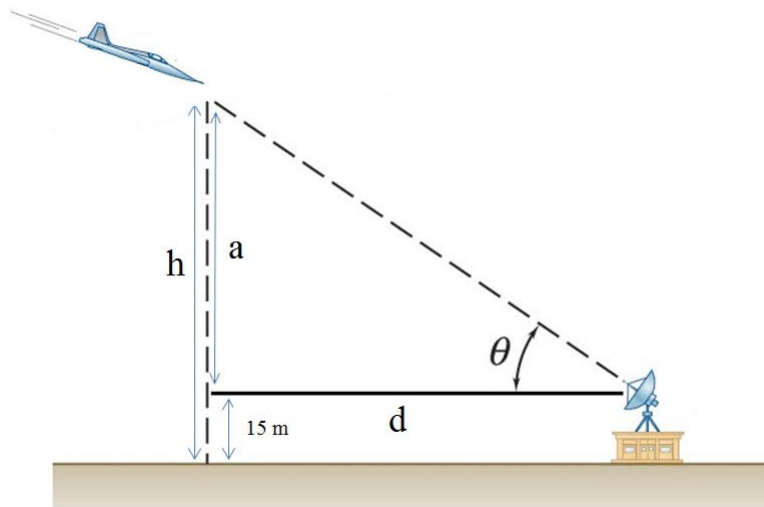


Figura 18. Cálculo del ángulo de elevación entre avión y torre de control actuando ésta como receptor

El cálculo es el mismo que se explica en el apartado 5.1.2

Una vez hallado el ángulo, hay que irse al diagrama de radiación de elevación proporcionado por el fabricante y aplicar el factor corrector correspondiente como una pérdida adicional sobre la potencia de señal recibida.

7.3.2 Potencia de señal recibida

La potencia de la señal recibida (P_s) se mide justo a continuación de la antena receptora y tiene en cuenta la potencia de la señal transmitida, así como las pérdidas de enlace del medio.

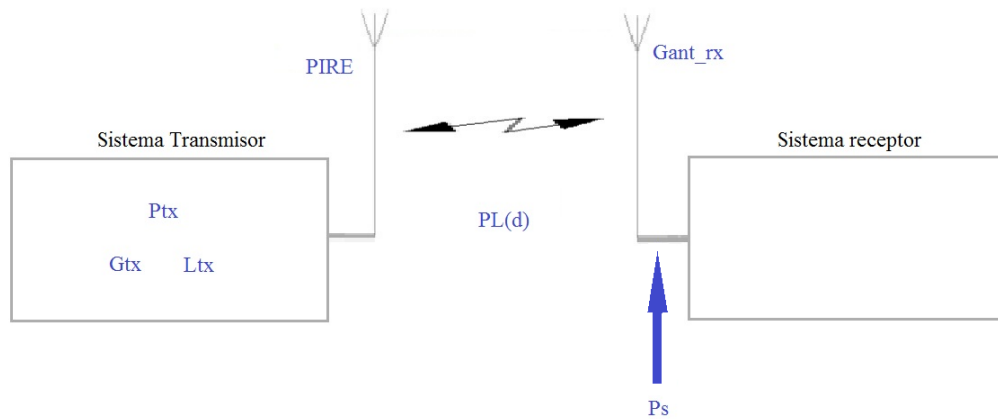


Figura 19. Potencia de señal recibida en el sistema receptor

Para el cálculo de la potencia de la señal recibida, se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$P_s = PIRE - Pl(d) + G_{Ant_{rx}} - FC_{Ant} - L_{cable_{rx}} - L_{con} \quad [25]$$

Donde:

P_s = Potencia de la señal a la entrada del sistema receptor (dBm)

$PIRE$ = Potencia de señal que sale del sistema transmisor (dBW)

$PL(d)$ = Pérdidas de enlace (dB)

$G_{Ant_{rx}}$ = Ganancia de la antena receptora (dB)

$L_{cable_{rx}}$ = Pérdidas del cable de la antena receptora (dB)

FC_{Ant} : Factor de corrección introducido por la antena receptora (dB)

L_{con} : Pérdidas introducidas por los conectores (dB)

7.3.1 Figura de ruido (F)

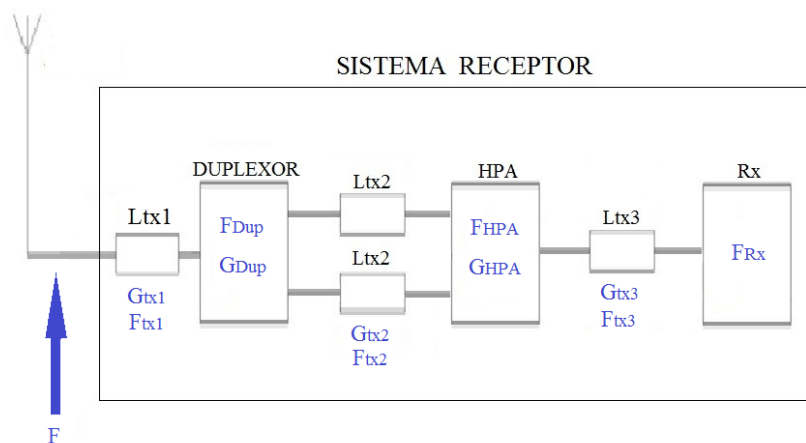


Figura 20. Figura de ruido del sistema receptor

$$F = F_{tx1} + \frac{(F_{Dup}-1)}{G_{tx1}} + \frac{(F_{tx2}-1)}{G_{tx1}G_{Dup}} + \frac{(F_{HPA}-1)}{G_{tx1}G_{Dup}G_{tx2}} + \frac{(F_{tx3}-1)}{G_{tx1}G_{Dup}G_{tx2}G_{HPA}} + \frac{(F_{Rx}-1)}{G_{tx1}G_{Dup}G_{tx2}G_{HPA}G_{tx3}} \quad [26]$$

Donde todos los parámetros tienen que estar expresados en unidades naturales.

F = Figura de ruido total del sistema receptor

F_{txn}: Figura de ruido de la línea de transmisión 'n'

G_{txn}: Ganancia de la línea de transmisión 'n'

F_{Dup}: Figura de ruido del duplexor

G_{Dup}: ganancia del duplexor

F_{HPA}: Figura de ruido del HPA

G_{HPA}: ganancia del HPA

F_{Rx}:Figura de ruido del equipo receptor

Como:

$$\begin{cases} G_{tx} = -L_{tx} \\ F_{tx} = L_{tx} \end{cases}$$

Siendo:

L_{tx}: Pérdidas de la línea de transmisión (unidades naturales)

Tenemos:

$$F = L_{tx1} + (F_{Dup} - 1)L_{tx1} + \frac{(L_{tx2}-1)L_{tx1}}{G_{Dup}} + \frac{(F_{HPA}-1)L_{tx1}L_{tx2}}{G_{Dup}} + \frac{(F_{tx3}-1)L_{tx1}L_{tx2}}{G_{Dup}G_{HPA}} + \frac{(F_{Rx}-1)L_{tx1}L_{tx2}L_{tx3}}{G_{Dup}G_{HPA}} \quad [27]$$

7.3.2 Temperatura de ruido del sistema (Tsys)

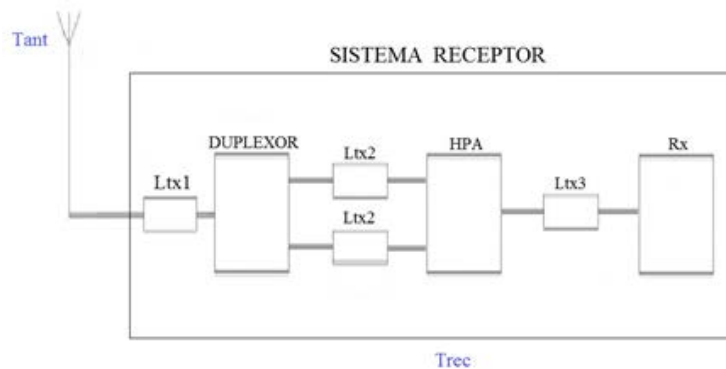


Figura 21. Temperatura de ruido del sistema receptor

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{rec} \quad [28]$$

T_{sys} = Temperatura de ruido equivalente en el sistema receptor completo (K)

T_{ant} = Temperatura de ruido equivalente en la antena receptora (K)

T_{rec} = Temperatura de ruido equivalente del equipo receptor (K)

7.3.2.1 Temperatura de ruido de la antena (T_{ant})

Para el cálculo de la temperatura de ruido equivalente de la antena receptora, se han utilizados una serie de curvas que nos proporcionan el factor de ruido externo (F_a) dependiendo de la frecuencia a la que se esté trabajando.

La siguiente figura cubre el rango de frecuencias que va de 10^4 a 10^8 Hz lo que sería de 10KHz a 100MHz para varias categorías de ruido. El ruido mínimo esperado se muestra en la figura mediante la curva roja. Para las curvas de ruido atmosférico, se han tenido en cuenta todas las horas del día, estaciones del año, y la superficie de la tierra completa

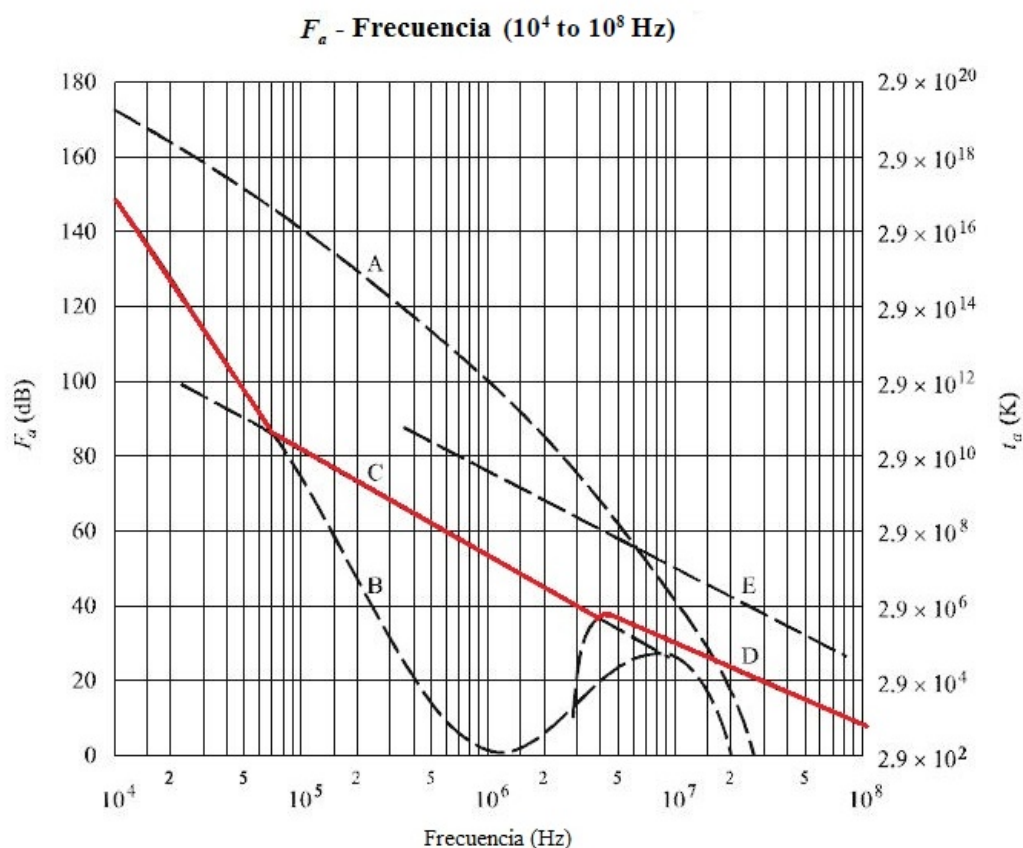


Figura 22. Temperatura de ruido en la antena a frecuencias entre 10^4 a 10^8 . RecITU-R P.372 [14]

A: ruido atmosférico, valor excedido el 0.5% del tiempo

B: ruido atmosférico, valor excedido el 99.5% del tiempo

C: humano haciendo ruido, sitio de recepción silencioso

D: ruido galáctico

E: humano haciendo ruido en una ciudad mediana

— : nivel de ruido mínimo esperado

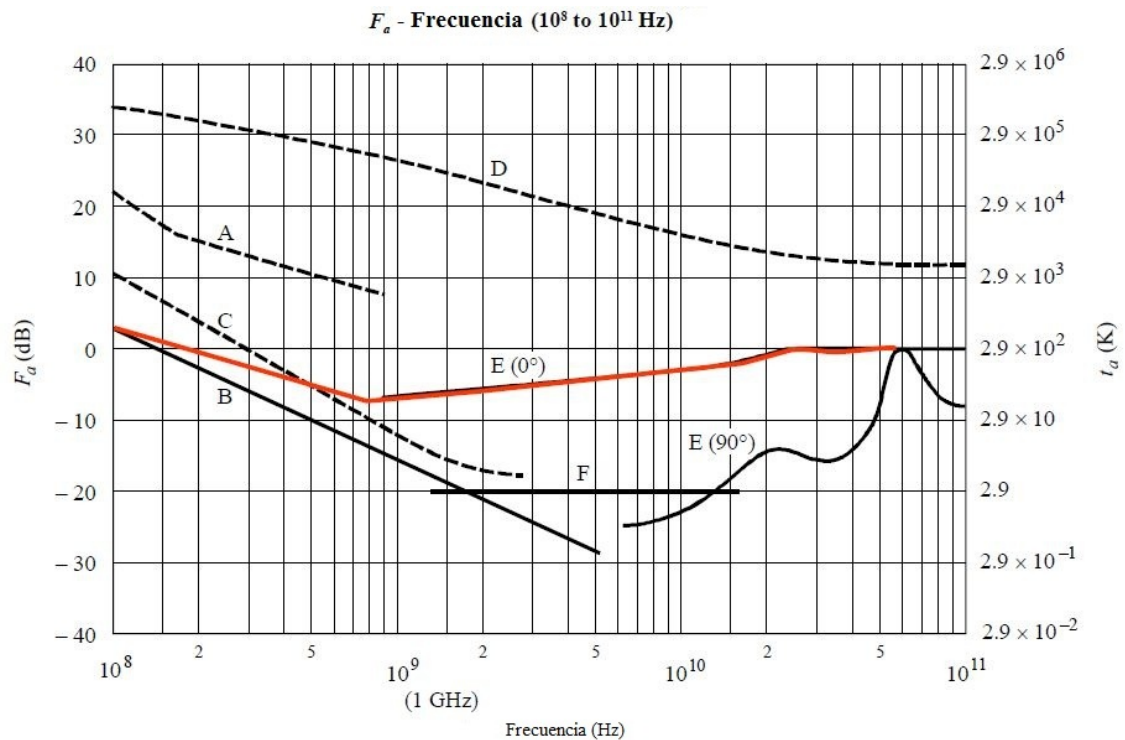


Figura 23. Temperatura de ruido en la antena a frecuencias entre 10^8 a 10^{11} . RecITU-R P.372 [14]

B: ruido galáctico

C: ruido galáctico (hacia el centro de la galaxia con ancho de haz infinitamente estrecho)

D: Sol calmado ($1/2^\circ$ de ancho de haz dividido al sol)

E: ruido celeste debido al oxígeno y al vapor de agua (antena de haz muy estrecho).
Curva superior con 0° de ángulo de elevación. Curva inferior con 90° de ángulo de elevación.

F: cuerpo negro (fondo cósmico) 2.7K

— : nivel de ruido mínimo esperado

Extrayendo F_a (Factor de ruido externo, dB) de las tablas en función de la frecuencia en la que estamos trabajando en el sistema, se puede calcular de una forma sencilla la temperatura equivalente de la antena de la forma que se indica a continuación:

$$T_a = f_a * T_o \quad [29]$$

Siendo:

T_a = Temperatura de ruido equivalente de la antena receptora

f_a = Factor de ruido externo (unidades naturales)

T_o = Temperatura equivalente de referencia (290K)

$$fa = (10)^{\frac{Fa}{10}} \quad [30]$$

7.3.2.2 Temperatura de ruido del receptor (T_{rec})

T_{rec} se refiere al cálculo de la temperatura de ruido equivalente del sistema receptor sin antena. La fórmula de cálculo es la que se indica a continuación:

$$T_{rec} = T_0 (F_{rec} - 1) \quad [31]$$

Donde:

T_{rec} = Temperatura de ruido equivalente en el sistema receptor (K) sin antena

T_0 : Temperatura de ruido de referencia (290 K)

F_{rec} : Figura de ruido del sistema receptor (unidades naturales) sin antena

7.3.3 Equipo receptor

Las especificaciones dadas en las hojas de características difieren mucho unas de otras en el caso concreto de los equipos receptores. En este proyecto se han aunado todas, en un marco común, para poder ser utilizadas por la herramienta sin ningún tipo de problema. A continuación se detallan los diversos parámetros habitualmente ocultos en las hojas de especificaciones de los fabricantes:

- Sensibilidad
- Figura de ruido
- E_b/N_0
- SNR
- BER

7.3.3.1 Cálculo de la Sensibilidad

La sensibilidad es un parámetro que habitualmente los fabricantes no proporcionan de manera directa, sino que dan ciertos parámetros con los que se ha calculado y hay que analizarlos para poder extraer la información y obtener el valor de la sensibilidad. En la mayoría de los casos, los equipos receptores trabajan tanto con voz como con datos, por lo que se distinguen dos sensibilidades distintas en el mismo equipo:

- Sensibilidad para recepción de voz
- Sensibilidad para recepción de datos

En ambos casos, habitualmente el fabricante proporciona **voltaje** al que se consigue una cierta SINAD o S+N/N, se pueden obtener las sensibilidades del receptor mediante el siguiente proceso. Sabiendo el parámetro de SINAD o S+N/N y la impedancia del equipo que habitualmente suele ser de 50Ω , el proceso a seguir es el siguiente:

Se calcula la potencia de la señal portadora necesaria para alcanzar los parámetros de SINAD o S+N/N dados mediante la fórmula descrita a continuación:

$$P_c \text{ (dBm)} = 10 \log \left(\frac{V^2}{Z} \right) + 30 \quad [32]$$

Pc: Potencia de la señal portadora (dBm)

V: Amplitud de la señal portadora (V)

Z: Impedancia del equipo receptor (Ω)

Una vez calculada la potencia de la portadora necesaria, se procede al cálculo de la sensibilidad del equipo receptor:

$$S = P_c + 10 \log \left(\frac{m^2}{2} \right) \quad [33]$$

S: Sensibilidad del equipo receptor (dBm)

m: Índice de modulación (unidades naturales)

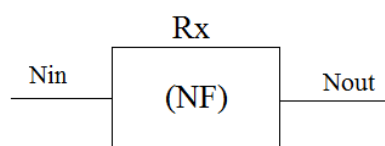
7.3.3.2 Cálculo de la Figura de ruido (F)

La figura de ruido del equipo receptor es un parámetro que los fabricantes no indican en las hojas de características, por lo que hay que extraerlo de la información que se da. Dependiendo del tipo de información que se recibe, se distinguen dos figuras de ruido diferentes:

- Figura de ruido para recepción de voz
- Figura de ruido para recepción de datos

7.3.3.2.1 Modulación AM

Conociendo el Ancho de banda (Bs) de la señal y la SNR necesaria para conseguir un cierto valor de sensibilidad en el receptor, se puede deducir el valor de la figura de ruido del receptor de la siguiente forma:



Sabiendo que

$$NF(dB) = N_{out}(dBm) - N_{in}(dBm) \quad [34]$$

Cálculo de N_{in} :

$$N_{in} = N_{externo} + 10 \log(Bs) \quad [35]$$

Siendo:

Bs : Ancho de banda de la señal recibida (Hz)

$N_{externo}$: Potencia de ruido a la entrada del receptor por efectos ambientales (dBm)

$$N_{externo} = 10 \log(KT)$$

K : cte de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T : Temperatura de ruido ambiente (300 K)

Cálculo de N_{out} :

$$N_{out} = AM_{carrier} - SNR_{req} \quad [36]$$

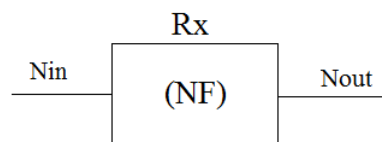
Siendo:

$AM_{carrier}$: Potencia de la portadora de la señal recibida (dBm)

SNR_{req} : Relación señal a ruido requerida por el sistema para obtener los parámetros de calidad deseados (dB)

7.3.3.2.2 VDL

Conociendo el Ancho de banda (Bs) de la señal y la SNR necesaria para conseguir un cierto valor de sensibilidad en el receptor, se puede deducir el valor de la figura de ruido del receptor de la siguiente forma:



Sabiendo que

$$NF(dB) = VDL_{N_{out}}(dB) - VDL_{N_{in}}(dB) \quad [37]$$

Cálculo de VDL N_{in} :

$$N_{in} = VDL_{N_{externo}} + 10 \log(Bs) \quad [38]$$

Siendo:

Bs: Ancho de banda de la señal recibida (Hz)

VDL_ $N_{externo}$: Suelo de Potencia de ruido, a la entrada del receptor (dB)

$$VDL_{N_{externo}} = 10 \log(KT) \quad [39]$$

K: cte de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T: Temperatura de ruido ambiente (300 K)

Cálculo de VDL N_{out} :

$$VDL_{N_{out}} = VDL_S - SNR_{req} \quad [40]$$

Siendo:

VDL_S: Sensibilidad requerida en el sistema receptor (dBm)

SNR_{req}: Relación señal a ruido requerida por el sistema para obtener los parámetros de calidad deseados (dB)

7.3.3.3 Equivalencia entre las distintas medidas de calidad del equipo receptor

Para aunar las especificaciones dadas por los fabricantes sobre los equipos receptores, se ha llegado a la siguiente conclusión.

Dados unos parámetros representativos de los sistemas de comunicaciones aeronáuticas:

$$B = 8.3 \text{ KHz}, \quad \frac{S}{N} = \frac{S+N}{N} = \frac{S+N+D}{N+D} = 10dB, \quad D = 5\%(Ps)$$

Se calcula la potencia de ruido para ese ancho de banda:

$$N = -174 \left(\frac{dBm}{Hz} \right) + 10 \log B(Hz) = -135 \text{ dBm} \quad [41]$$

$$\frac{S}{N} = 10 \text{ dB}, S = -125 \text{ dBm}$$

$$\frac{S+N}{N} = 10 \text{ dB}, S = -125.46 \text{ dBm}, \Delta = \pm 0.46 \text{ dB}$$

$$\frac{S+N+D}{N+D} = 10 \text{ dB}, S = -122.86 \text{ dBm}, \Delta = \pm 2.14 \text{ dB}$$

Reduciendo el valor de las relaciones queda:

$$B = 8.3 \text{ KHz}, \frac{S}{N} = \frac{S+N}{N} = \frac{S+N+D}{N+D} = 5 \text{ dB}, \quad D = 5\% (P_s)$$

La potencia de ruido es la misma, porque el ancho de banda no ha variado:

$$\frac{S}{N} = 5 \text{ dB}, S = -130 \text{ dBm}$$

$$\frac{S+N}{N} = 5 \text{ dB}, S = -129 \text{ dBm}, \Delta = \pm 1 \text{ dB}$$

$$\frac{S+N+D}{N+D} = 5 \text{ dB}, S = -128 \text{ dBm}, \Delta = \pm 2 \text{ dB}$$

Aumentando el valor de las relaciones queda:

$$B = 8.3 \text{ KHz}, \frac{S}{N} = \frac{S+N}{N} = \frac{S+N+D}{N+D} = 12 \text{ dB}, \quad D = 5\% (P_s)$$

La potencia de ruido es la misma, porque el ancho de banda no ha variado:

$$\frac{S}{N} = 12 \text{ dB}, S = -123 \text{ dBm}$$

$$\frac{S+N}{N} = 12 \text{ dB}, S = -123.286 \text{ dBm}, \Delta = \pm 0.286 \text{ dB}$$

$$\frac{S+N+D}{N+D} = 12 \text{ dB}, S = -117.4 \text{ dBm}, \Delta = \pm 5.6 \text{ dB}$$

Aunando resultados, se llega a la conclusión que:

Calculado	S/N	(S+N)/N	SINAD
Dado			
S/N	-	-0.6 dB	+3.2 dB
(S+N)/N	+0.6 dB	-	+2.5 dB
SINAD	-3.2 dB	-2.17 dB	-

Tabla 4. Equivalencia entre las medidas de calidad de un receptor

7.4 Resultados del sistema

Los resultados proporcionados por el sistema de comunicaciones completo, se calculan como se indica a continuación.

7.4.1 Medida de la SNR

En comunicaciones la medida de la SNR suele hacerse en el sistema receptor. En este proyecto los niveles de SNR proporcionados son todos tomados como punto de referencia en la entrada del receptor, justo después de la antena receptora.

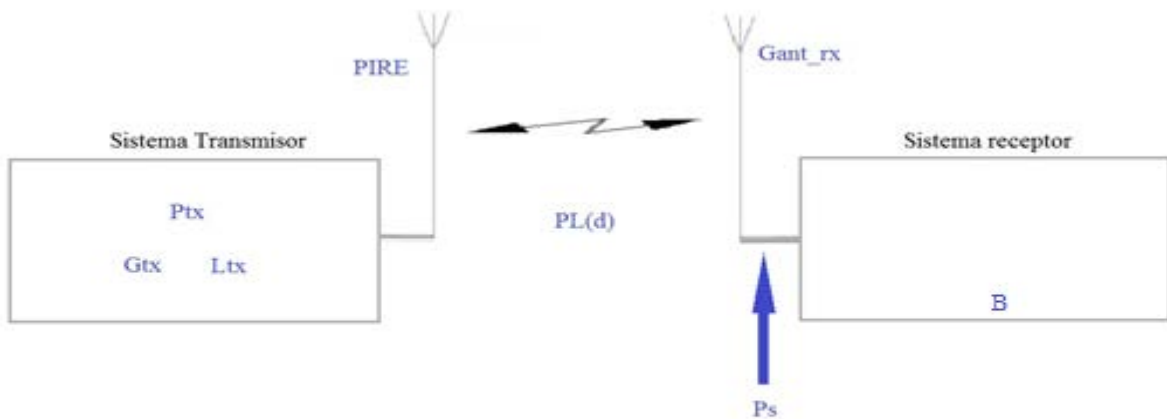


Figura 24. Medida de la SNR

La medida de la SNR en este caso es:

$$SNR (dB) = 10 \log \left(\frac{P_s}{K * T * B} \right) \quad [42]$$

Donde:

SNR: Relación señal a ruido (dB)

Ps: Potencia de la señal recibida en el sistema receptor (W)

K: Constante de Boltzman $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)

T: Temperatura de ruido equivalente del sistema receptor (K)

B: Ancho de banda del sistema (Hz)

El cálculo de la T se encuentra explicado en el apartado 4.1.3.2

7.4.2 Medida de la EbN0

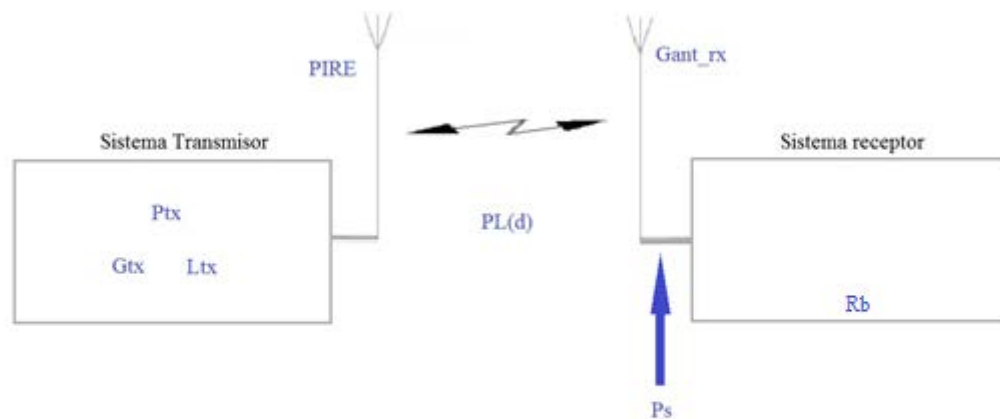


Figura 25. Medida de la EbN0 [17]

EbN0 es la energía por bit por densidad espectral de potencia de ruido. Se define como:

$$EbN0 (dB) = 10 \log \left(\frac{Ps}{K * T * Rb} \right) \quad [43]$$

Donde:

EbN0: Relación energía por bit por densidad espectral de potencia de ruido (dB)

Ps: Potencia de la señal recibida en el sistema receptor (W)

K: Constante de Boltzman $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)

T: Temperatura de ruido equivalente del sistema receptor (K)

B: Régimen binario del sistema (Hz)

Se relaciona con la SNR mediante una fórmula sencilla de la forma que se indica a continuación:

$$EbN0 \text{ (dB)} = 10 \log \left(SNR * \frac{Rb}{B} \right) \quad [44]$$

Donde:

EbN0: Relación energía por bit por densidad espectral de potencia de ruido (dB)

SNR: Relación señal a ruido (unidades naturales)

B: Ancho de banda del sistema (Hz)

7.4.3 Medida de la BER

La BER o Pe (Probabilidad de error de bit) es una medida que nos indica qué cantidad de bits recibidos están defectuosos y por lo tanto no se pueden identificar.

Hay que destacar que en este proyecto las medidas de **BER** que se dan, son todas de **bits sin codificar**, es decir, que se va a trabajar con valores alrededor de los **10^{-3} a 10^{-5}** . Esto es así, porque al ser bits que no están protegidos mediante la codificación, un nivel de BER de estos órdenes de magnitud es aceptable para establecer una comunicación con un nivel de calidad correcto.

Por el contrario si se trabajase con niveles de BER expresados sobre bits ya codificados, se tendrían que dar valores de 10^{-6} en adelante.

La BER está directamente relacionada con la técnica de modulación que se utiliza para la transmisión de los datos y con la EbN0 obtenida en el receptor. Esta probabilidad de error de bit se suele expresar mediante gráficas que relacionan los 3 parámetros mencionados. Por ello, al final de la memoria, en el apartado de anexos, se adjuntan las gráficas utilizadas para cada técnica de modulación usada en comunicaciones aeronáuticas tenida en cuenta en este proyecto.

7.4.1 Margen de enlace

Se refiere a la diferencia que existe entre la EbN0 objetivo marcada por el sistema receptor y la EbN0 obtenida por el sistema completo. También se puede calcular con la SNR.

Si el margen de enlace es positivo, significa que estamos por encima del mínimo exigido para que exista comunicación y vamos a tener cierta flexibilidad a la hora de ajustar el sistema.

Si por el contrario el margen de enlace es negativo, significa que estamos por debajo del mínimo de potencia de señal exigido y tenemos que ajustar el sistema para que pueda existir comunicación.

$$M \text{ (dB)} = EbN0 \text{ (dB)} - EbN0_{obj} \text{ (dB)} \quad [45]$$

Capítulo 8

GUI (Interfaz Gráfica de Usuario)

8.1 GUIDE

GUIDE® es un editor de interfaces gráficas de usuario (GUI) que dispone Matlab®. Esto permite realizar la interfaz gráfica deseada y posteriormente unirla con las funciones diseñadas en MATLAB. Si se selecciona File→New→**GUI** se puede diseñar una interfaz gráfica. Con esta herramienta se ha realizado la interfaz gráfica completa de este proyecto.

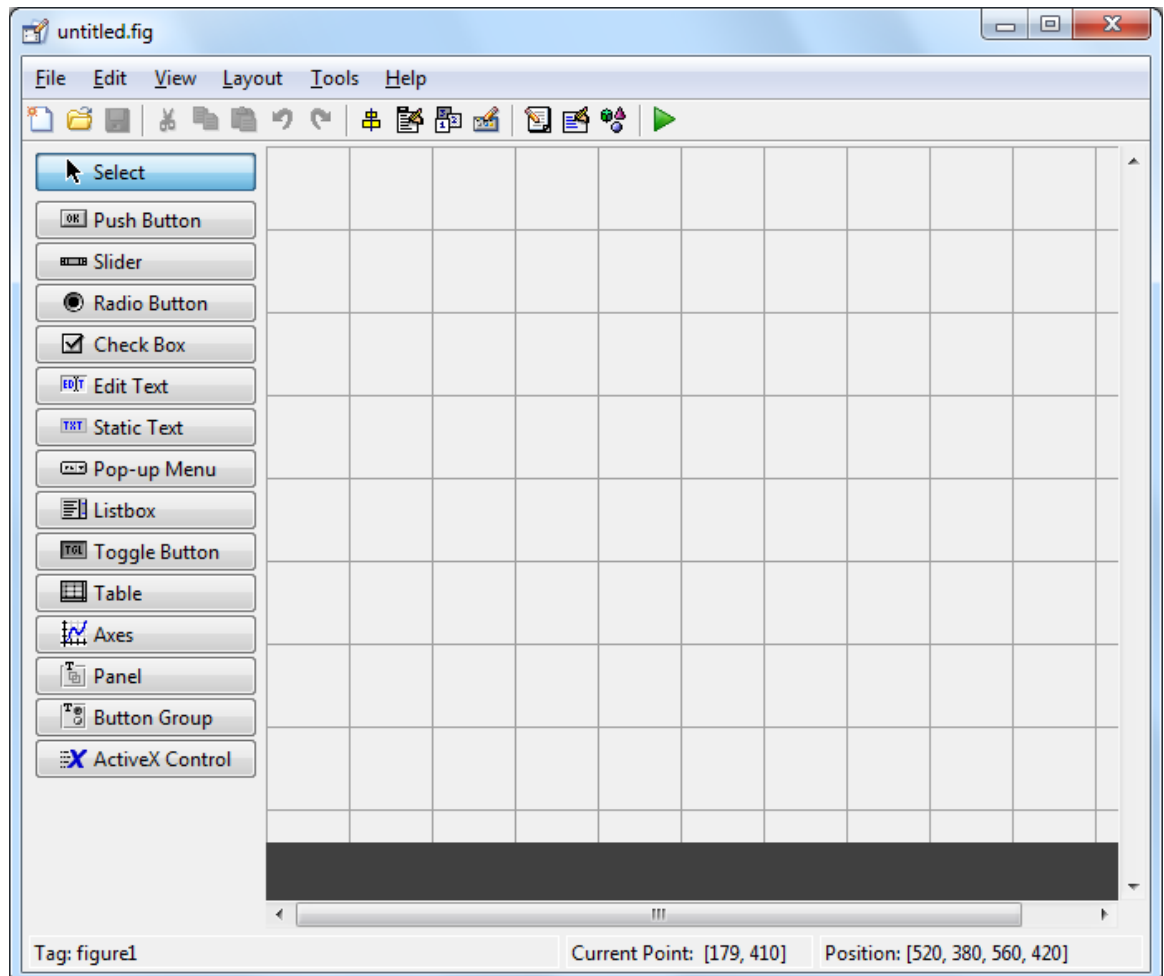


Figura 26. GUIDE

En el siguiente enlace se puede encontrar un buen manual de iniciación al Guide de Matlab. <http://es.scribd.com/doc/15532859/MANUAL-DE-GUI-EN-MATLAB>

8.2 Pantalla principal de la aplicación

Para comenzar a usar la aplicación hay que abrir el programa MATLAB y seleccionar la carpeta SOFTWARE incluida en este proyecto. A continuación ejecutar el archivo Main_Interface.m

Abrir MATLAB → **Abrir** → carpeta “**SOFTWARE**” → **Main_Interface.m**

Automáticamente se despliega la ventana inicial de la aplicación

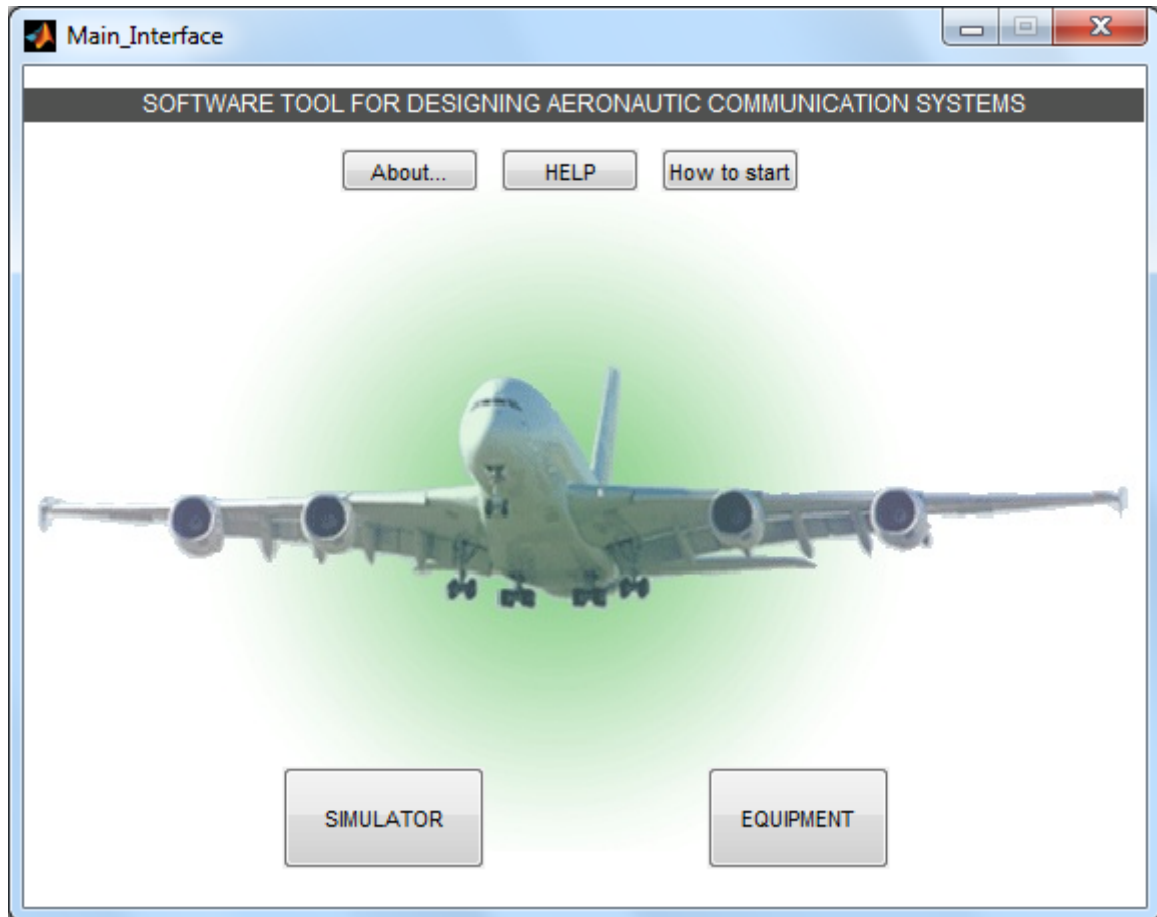


Figura 27. Pantalla principal de la aplicación

La aplicación está formada por dos bloques principales

- **SIMULATOR:** Da acceso al simulador de la aplicación
- **EQUIPMENT:** Permite añadir un nuevo dispositivo al sistema o editar un dispositivo existente.

8.3 Simulador

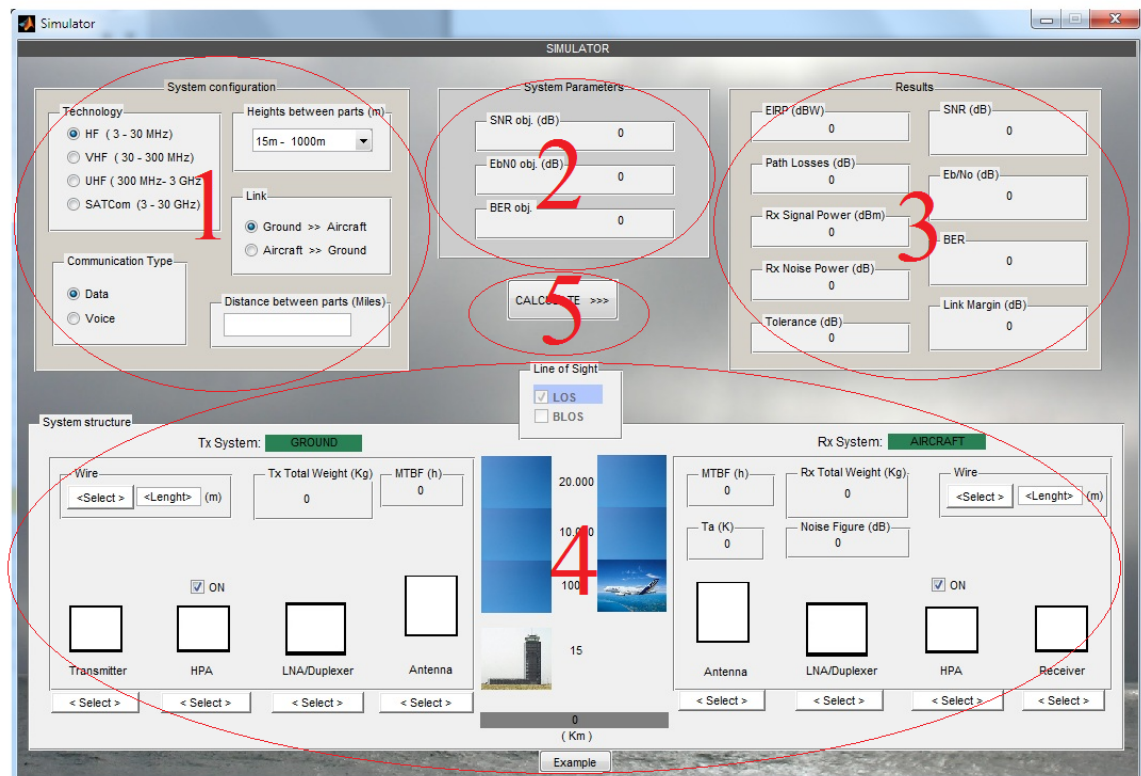


Figura 28. Simulador

1. Área de **configuración del sistema**. Donde se seleccionan los parámetros del sistema de comunicaciones a diseñar.

- **Technology:** Define la tecnología del sistema de comunicaciones deseado. Seleccionando un *radiobutton* u otro se cambia de tecnología y en consecuencia de banda de frecuencias.
- **Link:** Define la disposición del transmisor y el receptor. Tx>>Rx
- **Heightsbetweenparts:** Define la disposición espacial tanto del transmisor como del receptor con respecto a la superficie terrestre.
- **CommunicationType:** Define el tipo de información que se desea transmitir, datos o voz.
- **Distancebetweenparts:** Define la distancia en millas que hay entre el transmisor y el receptor.

2. Área de **parámetros del sistema**. Donde se muestran los parámetros que hay que cumplir para que exista comunicación entre el emisor y el receptor. Estos parámetros van a variar en función de los equipos seleccionados.

- **SNRobj:** Define el valor de relación señal a ruido objetivo que hay que conseguir en el receptor para que exista comunicación.
- **EbN0obj:** Define el valor de Energía de bit a potencia de ruido objetivo que hay que conseguir en el receptor para que exista comunicación.
- **BERobj:** Define el valor de Tasa de Error de Bit objetivo mínima que hay que conseguir en el receptor para que exista comunicación.

3. Área de **resultados**. Donde se muestran los datos, calculados por la aplicación, que proporciona el sistema de comunicaciones
 - **EIRP**: Define el valor de Potencia Radiada Isotrópica Equivalente que proporciona el sistema transmisor.
 - **Pathlosses**: Define en valor de pérdidas de potencia de señal debido a la propagación de la onda por el espacio.
 - **RxSignalPower**: Define el valor de la potencia de la señal recibida en la antena receptora.
 - **RxNoisePower**: Define el valor de figura de ruido que se obtiene del conjunto de equipos del sistema receptor.
 - **Tolerance**: Define el valor de tolerancia medida en decibelios que existe en el sistema de comunicaciones debido a la tolerancia de los equipos que lo componen.
 - **SNR**: Define el valor de relación señal a ruido obtenido en el sistema receptor.
 - **EbN0**: Define el valor de Energía de bit a potencia de ruido obtenido en el sistema receptor.
 - **BER**: Define el valor de Tasa de Error de Bit obtenido en el sistema receptor.
 - **Link Margin**: Define el valor de margen de enlace medido en dB. Este valor representa a la cantidad de dB por encima o por debajo de la EbN0 objetivo.
4. Área de la **estructura del sistema**. Donde se seleccionan los equipos del sistema de comunicaciones y donde se representan tanto el sistema transmisor como el sistema receptor. Una vez introducidos los equipos se pueden comprobar los parámetros que caracterizan al sistema.
 - **Systemstructure**: Engloba el sistema transmisor, el sistema receptor y el canal.
 - **TxSystem**: Engloba el conjunto de equipos del sistema transmisor y los parámetros básicos que definen al mismo.
 - **Wire**: Permite seleccionar un tipo de cable de la base de datos y la distancia del mismo a utilizar en el sistema transmisor.
 - **Transmitter**: Permite seleccionar un equipo transmisor de la base de datos.
 - **HPA**: Permite seleccionar un equipo HPA de la base de datos, además de activarlo o desactivarlo en función de las necesidades.
 - **LNA/Duplexer**: Permite seleccionar un equipo duplexor de la base de datos.
 - **Antenna**: Permite seleccionar una antena de la base de datos.
 - **Tx Total Weight**: Indica el valor del peso total del sistema transmisor completo.
 - **MTBF**: Indica el tiempo medio entre fallas del sistema transmisor.

- **RxSystem:** Engloba el conjunto de equipos del sistema receptor y los parámetros básicos que definen al mismo.
 - **Wire:** Permite seleccionar un tipo de cable de la base de datos y la distancia del mismo a utilizar en el sistema transmisor.
 - **Receiver:** Permite seleccionar un equipo receptor de la base de datos.
 - **HPA:** Permite seleccionar un equipo HPA de la base de datos, además de activarlo o desactivarlo en función de las necesidades.
 - **LNA/Duplexer:** Permite seleccionar un equipo duplexor de la base de datos.
 - **Antenna:** Permite seleccionar una antena de la base de datos.
 - **Rx Total Weight:** Indica el valor del peso total del sistema receptor completo.
 - **MTBF:** Indica el tiempo medio entre fallas del sistema receptor.
 - **Ta:** Indica la temperatura de ruido de la antena receptora.
 - **Noise Figure:** Indica la figura de ruido del sistema receptor completo.
5. Botón “**CALCULATE**”. La herramienta analiza parámetros que proporcionan los equipos seleccionados y calcula los resultados correspondientes.

8.3.1 LOS

- **Line of Sight:** Indica si el transmisor y el receptor están en visión directa o no. Esto va a depender tanto de la distancia entre ellos, como de las alturas a las que se encuentren.

Cuando la distancia entre transmisor y receptor, y la altura con respecto a la superficie terrestre de ambos, provoque LOS o BLOS, se le avisará al usuario.

CASO LOS

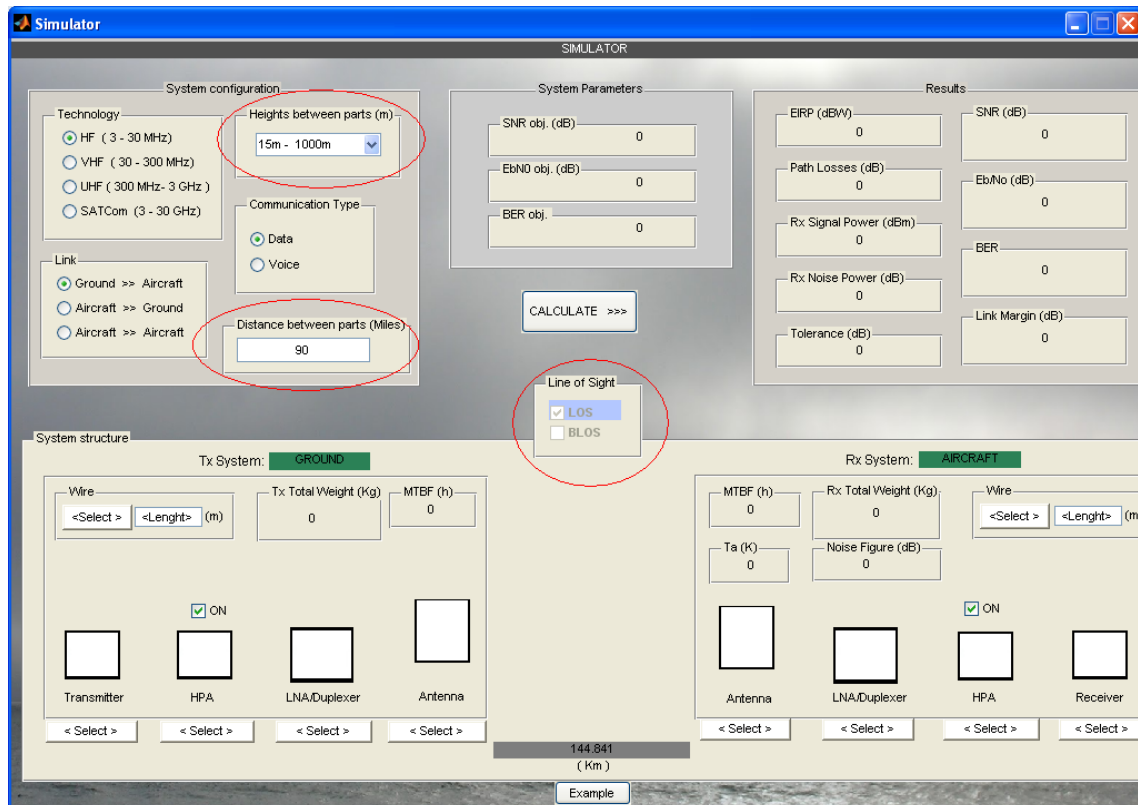


Figura 29. Simulador. Ejemplo de LOS en el simulador

CASO BLOS

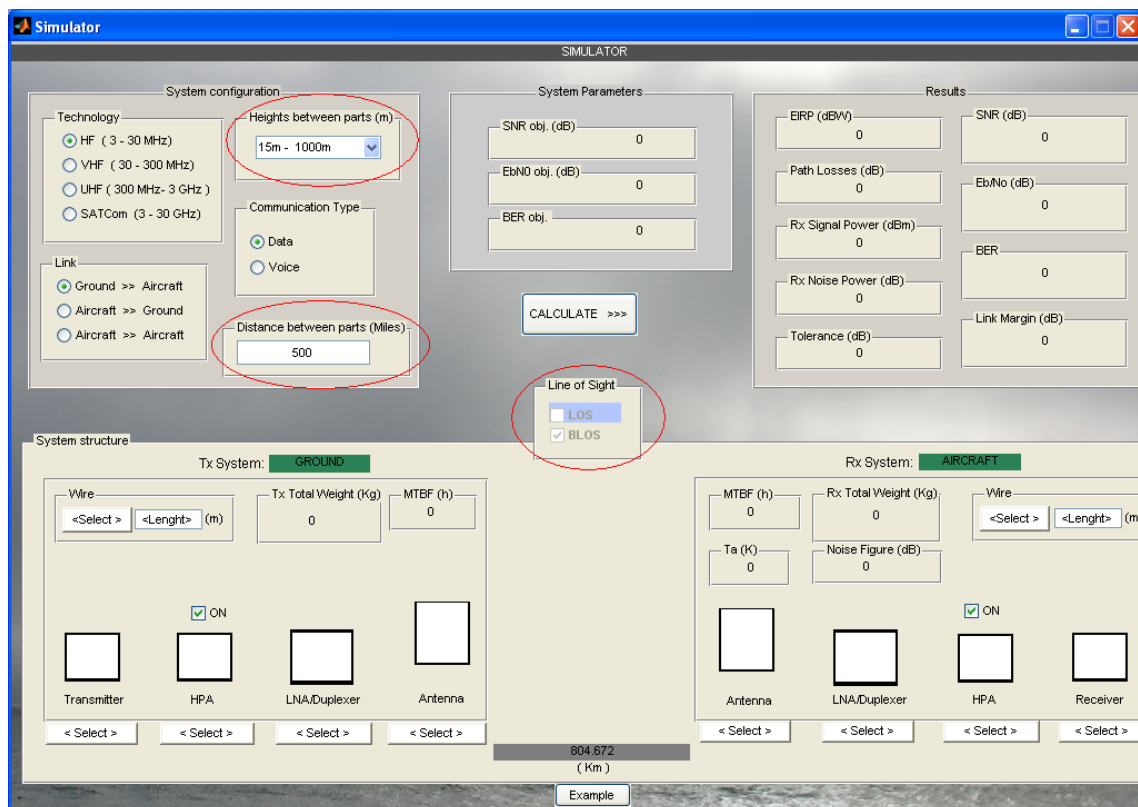


Figura 30. Simulador. Ejemplo de BLOS en el simulador

8.3.2 Análisis y cálculo de parámetros

Una vez seleccionados todos los parámetros de configuración del sistema e introducidos todos los equipos, basta con pulsar el botón **CALCULATE**, para poder observar los resultados que se obtienen.

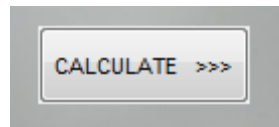


Figura 31. Simulador. Botón “CALCULATE”

Al pulsarlo, se analizan todos los datos introducidos y se calculan todos los parámetros que proporcionan los equipos seleccionados.

- Parámetros del sistema
- Resultados
- Parámetros del sistema transmisor
- Parámetros del sistema receptor

Si los **resultados obtenidos son favorables**, aparecerán marcados en color verde.

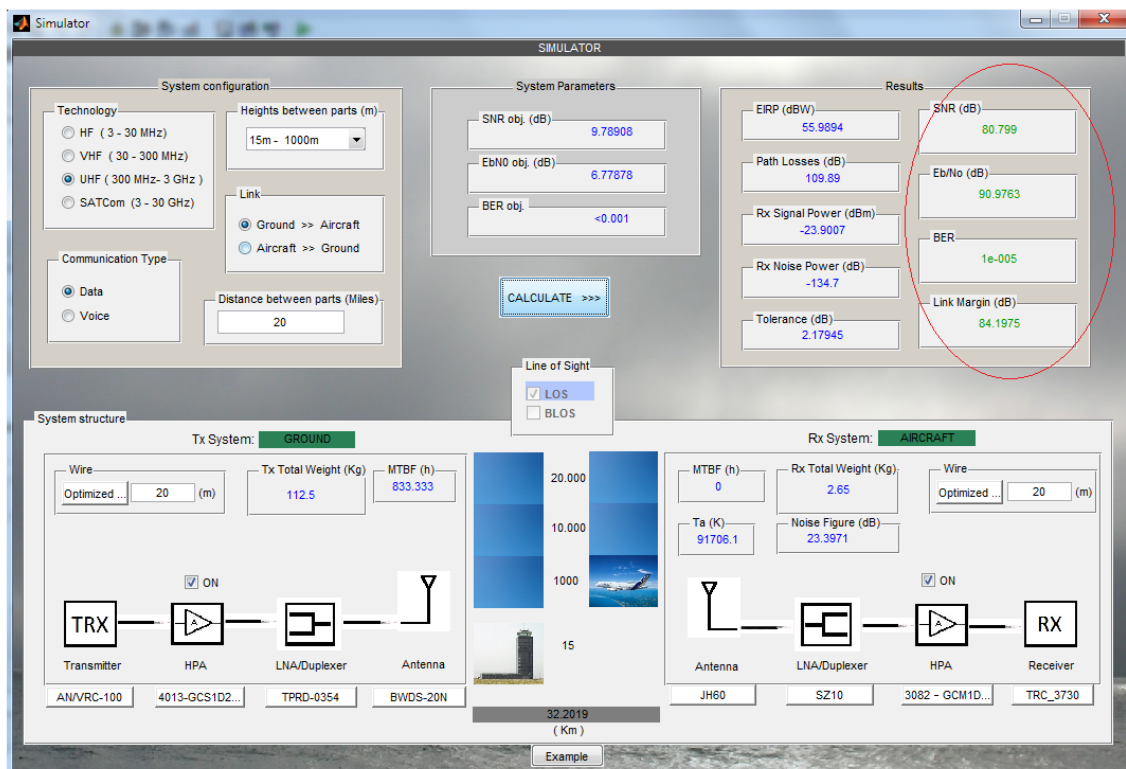


Figura 32. Siulador. Resultados favorables

Si por el contrario los **resultados obtenidos son desfavorables**, aparecerán marcados en color rojo.

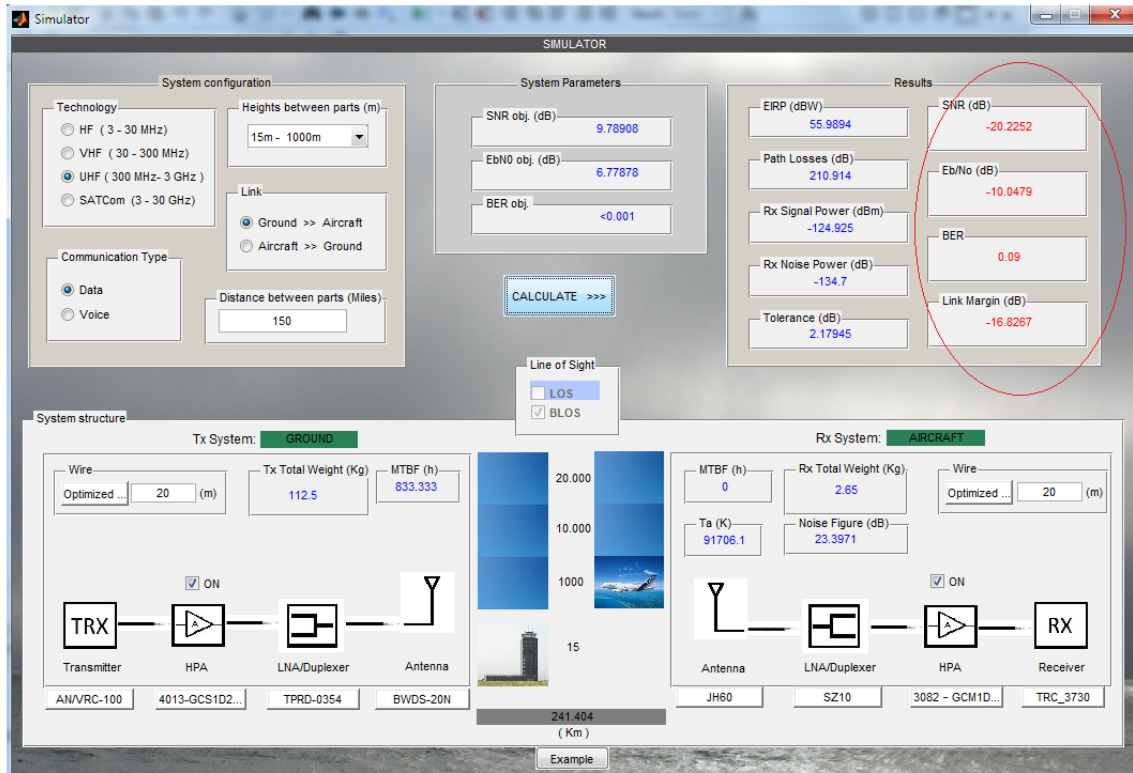


Figura 33. Simulador. Resultados desfavorables

8.4 Equipos

Al pulsar **Equipment** en la pantalla principal, aparece la interfaz de equipos en la que se puede seleccionar la opción de insertar un nuevo equipo al sistema o editar uno existente

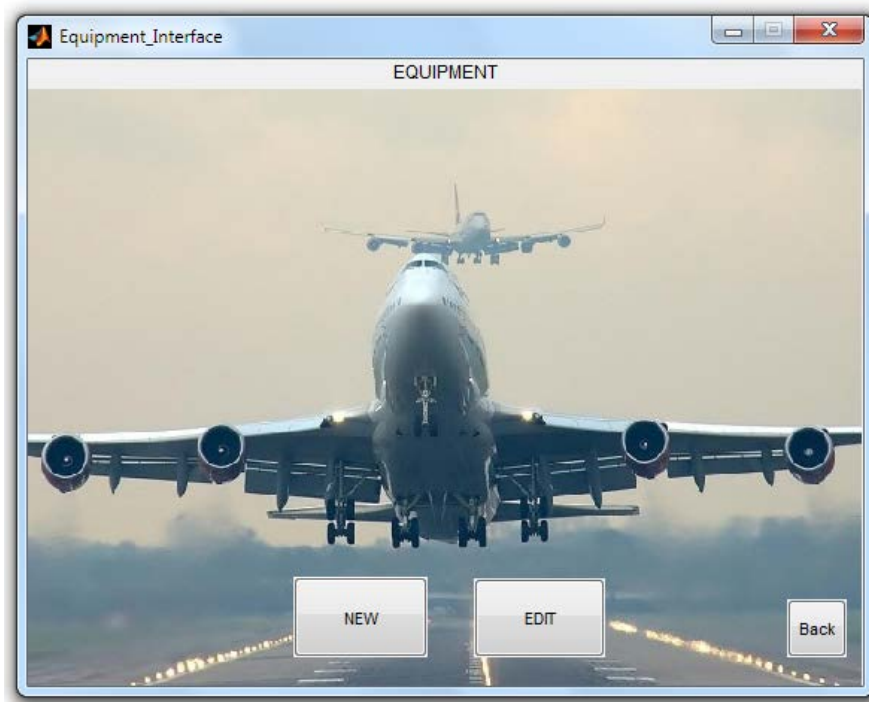


Figura 34. GUI de equipos

8.4.1 Introducción de nuevo equipo

- Para introducir un nuevo dispositivo al sistema, hay que seleccionar en la pantalla principal → **Equipment**
- Automáticamente aparece la pantalla “Equipment” en la que tenemos que seleccionar → **NEW**

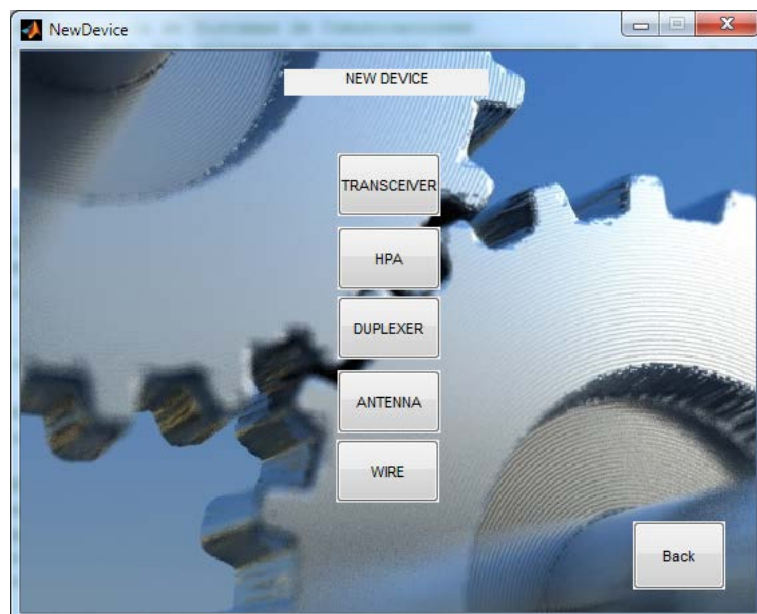


Figura 35. GUI de insertar nuevo dispositivo

The screenshot displays the 'NewTransceiver' application window. The main interface is titled 'TRANSCEIVER' and is divided into several sections:

- GENERAL FEATURES:** Includes fields for 'Location' (a dropdown menu), 'Company', and 'Name'. Below these is a 'Technology' section with four radio button options: 'HF (3 - 30 MHz)', 'VHF (30 - 300 MHz)', 'UHF (300 MHz - 3 GHz)', and 'SATCom (3 - 30 GHz)'. The 'HF' option is currently selected.
- MECHANICAL SPECIFICATIONS:** Contains input fields for 'Depth (cm)', 'Height (cm)', 'Width (cm)', 'Weight (Kg)', and 'Connector Type'.
- ENVIROMENTAL SPECIFICATIONS:** Includes fields for 'Temperature (Min) (°C)', 'Temperature (Max) (°C)', and 'Altitude (Max) (m)'. (Note: The spelling 'ENVIROMENTAL' is used in the image).
- Operating Specifications:** Features a field for 'MTBF (h)'.
- ELECTRICAL SPECIFICATIONS:** This section is further divided into 'VOICE' and 'DATA' sub-sections.
 - General:** Includes 'Modulation type' (dropdown), 'Modulation Index (%)', 'Frequency Min. (MHz)' (with a value of 3), 'Frequency Max. (MHz)' (with a value of 30), 'Bit Rate (bps)', and 'Signal Bandwidth (Hz)'.
 - Transmitter:** Includes 'Impedance (Ohms)' (with a value of 50), 'Tx Power (W)', 'Tx Carrier Power (W)', and 'Distorsion (%)'. (Note: The spelling 'Distorsion' is used in the image).
 - Receiver:** Includes 'Impedance (Ohms)' (with a value of 50), 'Sensitivity (dBm)', 'SINAD (dB)', '(S+N / N) (dB)', 'Voltage (µV)', 'BER <', 'SNR obj. (dB)', 'Eb/No obj. (dB)', 'Noise Figure (dB)', 'Distorsion (%)', and 'Dynamic Range (dB)'. (Note: The spelling 'Distorsion' is used in the image).

At the bottom of the window, there are three buttons: 'New', 'Save', and 'Back'. Additionally, there are 'Complete' buttons within the 'Transmitter' and 'Receiver' sub-sections of the 'ELECTRICAL SPECIFICATIONS' panel.

Figura 36. GUI de equipo transceptor

Al dar a guardar, el sistema analiza el tipo de equipo, tecnología utilizada y localización lo almacena en la carpeta correspondiente.

- Se puede comprobar que el dispositivo se ha guardado correctamente acudiendo a la carpeta de almacenamiento de equipos → [Equipment](#)

Si se selecciona un equipo, se pueden observar sus características almacenadas.

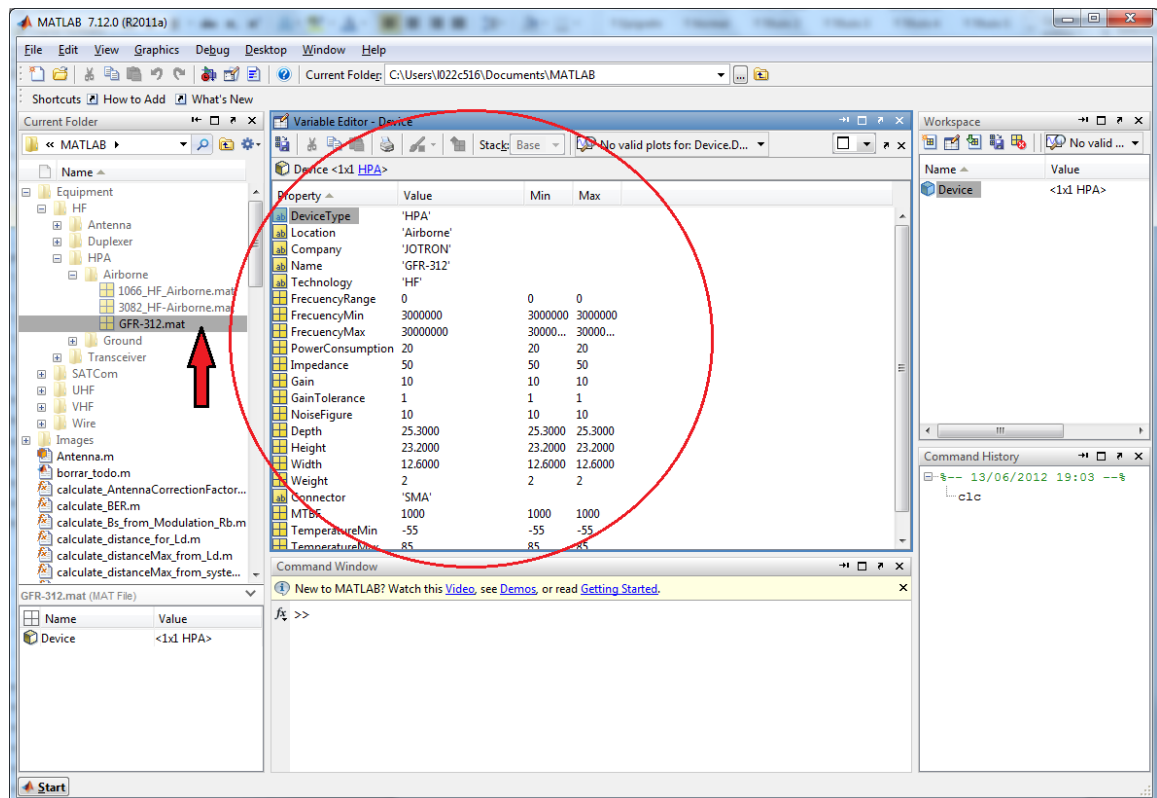


Figura 37. Ruta de guardado y visualización de parámetros del equipo

8.4.2 Modificación de equipos existentes

Para modificar un equipo se selecciona el botón **EDIT** en la pantalla de equipos

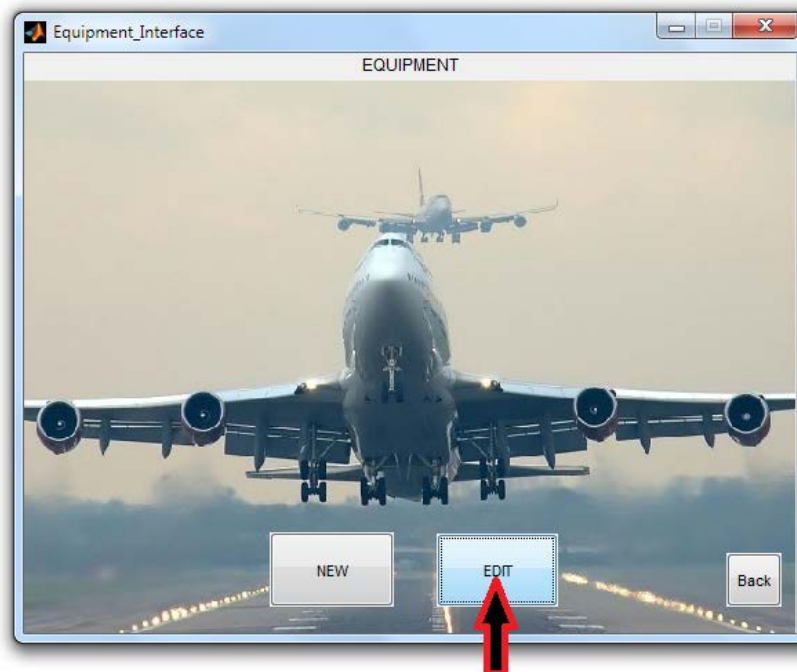


Figura 38. Editar un equipo existente

Y se selecciona el equipo deseado de la base de datos de la aplicación

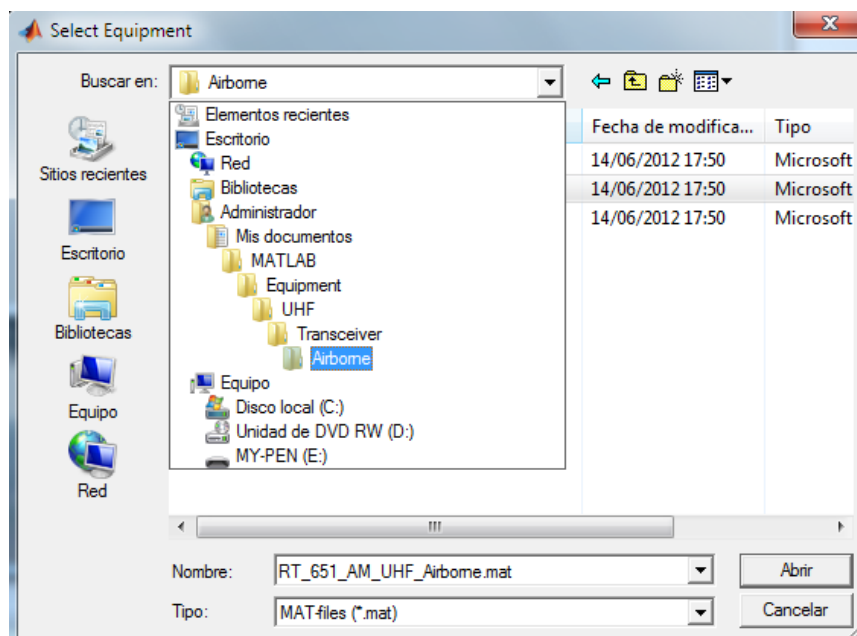


Figura 39. Selección del equipo a editar

EditTransceiver

TRANSCIVER

GENERAL FEATURES

Description:

Location:

Company:

Name:

Technology:

☐ HF

☒ VHF

☐ SATCom

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Depth: (cm)

Height: (cm)

Width: (cm)

Weight: (Kg)

Connector Type:

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Temperature (Min): (°C)

Temperature (Max): (°C)

Altitude (Max): (m)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

	VOICE	DATA
General		
Modulation type	<input type="text" value="AM"/>	<input type="text" value="D8PSK"/>
Modulation Index (%)	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="0"/>
Frequency Min. (MHz)	<input type="text" value="118"/>	<input type="text"/>
Frequency Max. (MHz)	<input type="text" value="139"/>	<input type="text"/>
Bit Rate (bps)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="31500"/>
Signal Bandwidth (Hz)	<input type="text" value="8330"/>	<input type="text" value="25000"/>
Transmitter		
Impedance (Ohms)	<input type="text" value="50"/>	<input type="text"/>
Tx Power (W)	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="25"/>
Distorsion (%)	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>
Modulation Level (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Receiver		
Impedance (Ohms)	<input type="text" value="50"/>	<input type="text"/>
SINAD (dB)	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="0"/>
Voltage (µV)	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2"/>
BER <	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.001"/>
SNR (dB)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="13.8722"/>
Eb/No (dB)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="12.8685"/>
Sensitivity (dBm)	<input type="text" value="-106.99"/>	<input type="text" value="-100.969"/>
Noise Figure (dB)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="15.1793"/>
Distorsion (%)	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.05"/>
Modulation Level (%)	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="120"/>

Save Back Complete Complete

Figura 40. Interfaz de edición de parámetros del equipo seleccionado

Capítulo 9

Objetos de programación diseñados

El funcionamiento de la aplicación se basa en la programación orientada a objetos, ya que el sistema de comunicaciones ha sido diseñado como un objeto en sí mismo el cual está compuesto a su vez de otros objetos. Este tipo de diseño permite tener estructurado el problema y separarlo en partes independientes. Con ello se consigue una programación más fácil y ordenada, además de ser flexible a la hora de realizar cambios en el código.

A continuación se muestra una figura que representa la estructura de objetos del sistema de comunicaciones.

9.1 Estructura de objetos del sistema

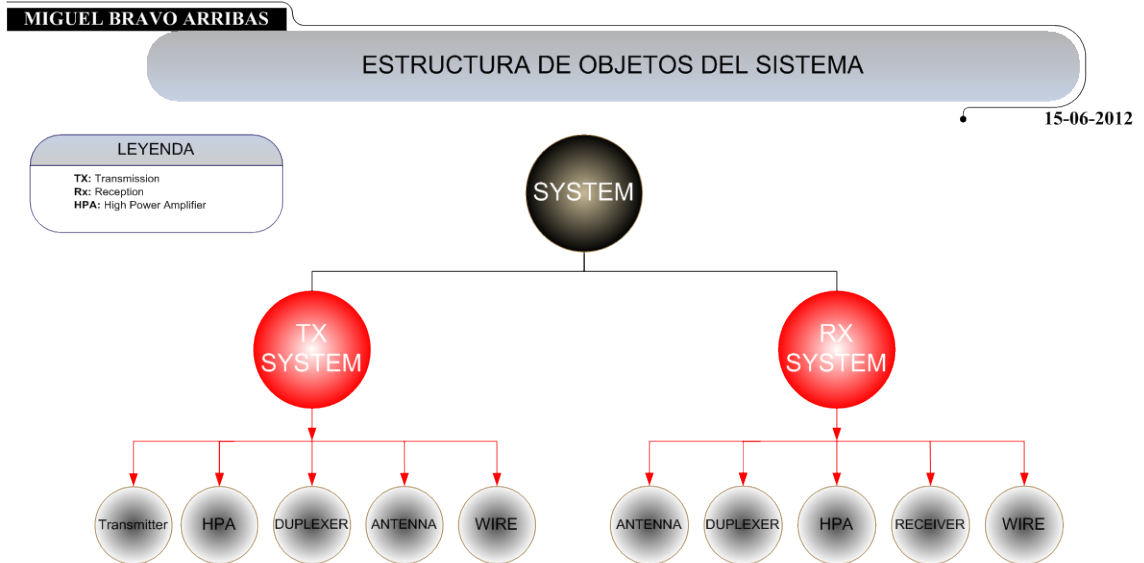


Figura 41. Estructura de objetos del sistema

9.2 Objeto “System”

Es un objeto que representa al sistema de comunicaciones completo. Las características del objeto definen los parámetros generales del sistema tales como tecnología, distancia entre Tx y Rx, LOS, etc.

Este a su vez está formado por dos objetos mayores que son el objeto que representa al sistema transmisor y el objeto que representa al sistema receptor.

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Sistema Completo](#)

9.3 Objeto “TxSystem”

Es un objeto que representa al bloque transmisor. Las características del objeto definen los parámetros específicos del sistema transmisor tales como el peso del conjunto de equipos que lo forman, EIRP, etc

Este a su vez está formado por cinco objetos más, que representan a los distintos equipos que lo forman.

- Transceptor
- HPA
- Duplexor
- Antena
- Cable

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Sistema transmisor](#)

9.4 Objeto “RxSystem”

Es un objeto que representa al bloque receptor. Las características del objeto definen los parámetros específicos del sistema receptor tales como el peso del conjunto de equipos que lo forman, figura de ruido, etc

Este a su vez está formado por cinco objetos más, que representan a los distintos equipos que lo forman.

- Transceptor
- HPA
- Duplexor
- Antena
- Cable

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Sistema receptor](#)

9.5 Objeto “Transmitter”

Es un objeto que representa al equipo transmisor. Las características del objeto definen los parámetros específicos del equipo transceptor en modo transmisión.

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Transmisor](#)

9.6 Objeto “HPA”

Es un objeto que representa al equipo amplificador de alta potencia. Las características del objeto definen los parámetros específicos del equipo.

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [HPA](#)

9.7 Objeto “Duplexer”

Es un objeto que representa al equipo duplexor. Las características del objeto definen los parámetros específicos del equipo.

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Duplexor](#)

9.8 Objeto “Wire”

Es un objeto que representa al cable utilizado. Las características del objeto definen los parámetros específicos del cable.

Para ver en detalle los atributos específicos del objeto, ver Anexo--- Atributos de los objetos programados → [Cable](#)

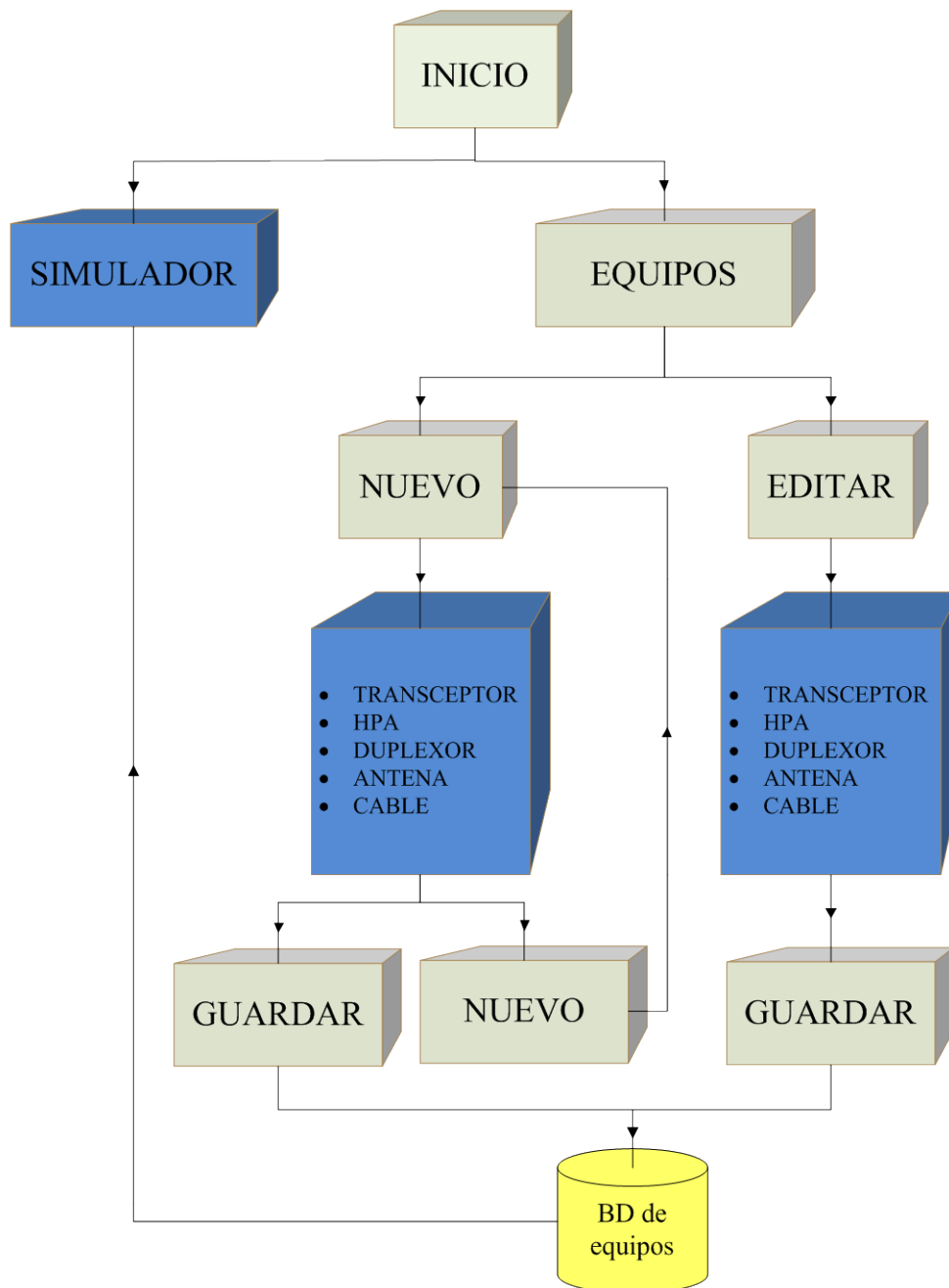
Capítulo 10

Funcionamiento de la aplicación

10.1 Estructura de la aplicación

MIGUEL BRAVO ARIBAS**ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN**

15-06-2012

*Figura 42. Estructura de la aplicación*

10.2 Funcionamiento del simulador

MIGUEL BRAVO ARRIBAS

FUNCIONAMIENTO INTERNO DEL SIMULADOR

15-06-2012

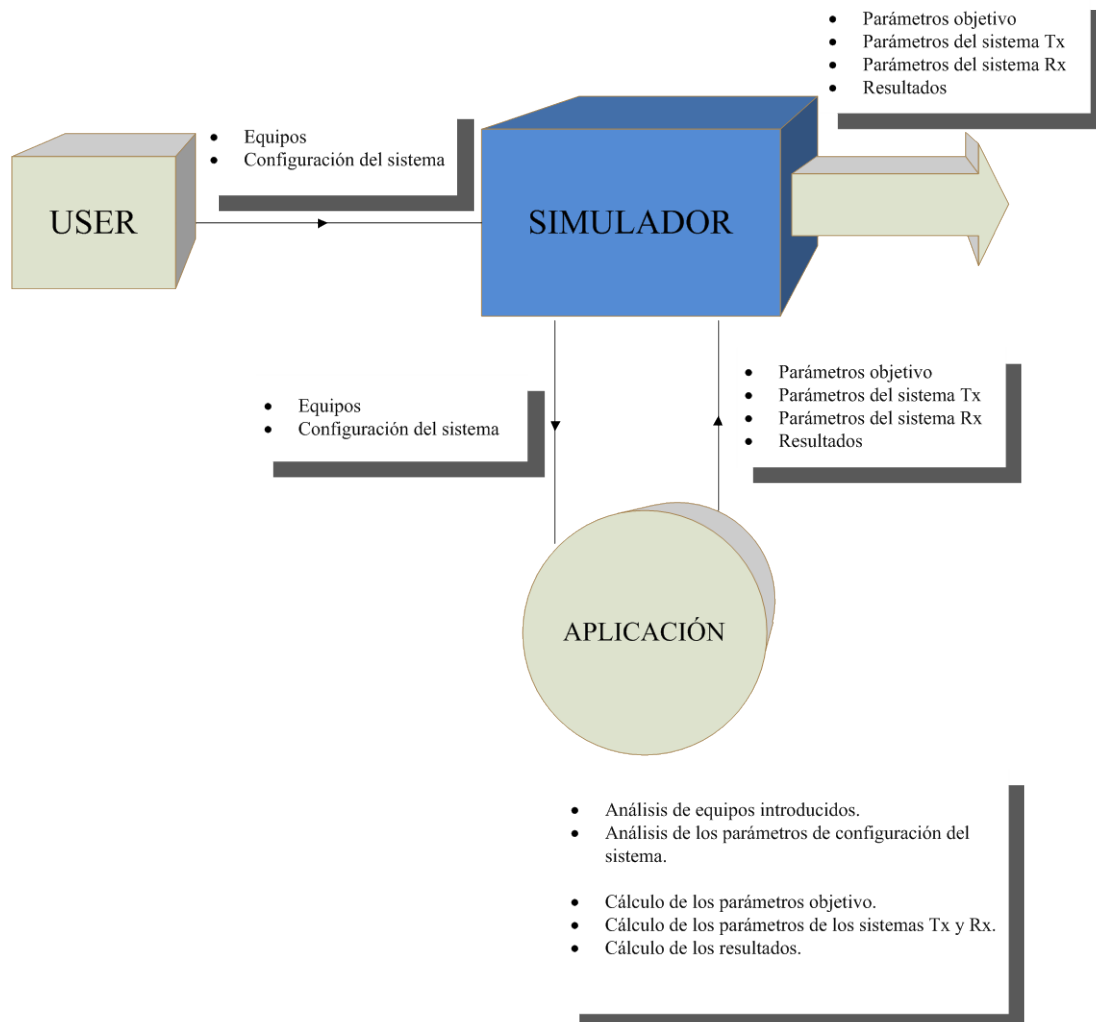


Figura 43. Proceso de interacción con el simulador

Capítulo 11

Guía de Usuario

Debido a la dimensión que abarcaría en esta memoria una explicación completa del uso de la aplicación, se proporciona una guía de usuario completa con todo detalle junto con la memoria y demás información del proyecto. En la guía de usuario se detalla la siguiente información:

- Iniciar la aplicación
- Insertar un nuevo equipo
- Editar un equipo existente
- Interfaces de los equipos
 - Transceptor, HPA, duplexor, antena, cable
- Simulador
 - Configuración del sistema
 - Parámetros del sistema
 - Resultados
 - Estructura del sistema
 - LOS
 - Análisis y cálculo de parámetros
 - Selección de equipos
 - Botón “Example”

Si desea acceder ahora a la guía de usuario, por favor abra el documento llamado “GUÍA DE USUARIO” ubicado en la carpeta del proyecto.

PARTE IV

CONCLUSIONES E INFORMACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

Capítulo 12

Conclusiones

- Con esta aplicación cualquier **estudiante** relacionado con las **comunicaciones aeronáuticas** va a poder aprender de una forma sencilla y cómoda.
- Un **ingeniero** va a poder **diseñar** un sistema de equipos de comunicaciones y observar los resultados que éste le proporciona, al instante.
- Se han **aunado** las **especificaciones** proporcionadas por los fabricantes, ayudando así a la obtención de parámetros necesarios para el diseño.

Capítulo 13

Futuras líneas de ampliación

- Ampliación de la BD de equipos de comunicaciones.
- Incluir diversos modelos de canal.
- Introducción de más elementos al sistema como controladores, etc
- Cálculo de retardo de los equipos del sistema obteniendo así el retardo medio del sistema completo.
- Creación de una aplicación similar, de diseño de comunicaciones marítimas, con la posibilidad de que puedan interactuar entre ellas.

Capítulo 14

Presupuesto

14.1 Introducción

El presente presupuesto hace referencia a un proyecto de realización de un software informático, desarrollado en MATLAB, para el diseño de sistemas de comunicaciones aeronáuticas.

Este proyecto se trata de desarrollar una aplicación informática que permita un usuario, de forma gráfica, diseñar un sistema de comunicaciones en el ámbito de la ingeniería aeronáutica, definiendo tanto el bloque de transmisión, como el de recepción del sistema. Además permite la configuración de varios modelos de sistemas en función de la tecnología y banda de frecuencias en la que se quiera trabajar. Abarca desde una comunicación en HF transatlántica, una comunicación vía radio usando modulaciones analógicas como AM y FM, hasta una comunicación satelital entre torre la de control y el avión trabajando en las bandas de gigahercios. De forma gráfica el usuario puede seleccionar los equipos que se desean incluir al sistema, desde una base de datos de equipos de comunicaciones aeronáuticas reales.

Adicionalmente la aplicación presenta una herramienta de aumento de prestaciones de equipos, en la cual se pueden introducir los parámetros de las hojas de

características proporcionadas por los fabricantes, para ser analizados. La aplicación analiza los parámetros insertados por el usuario, y en función de los datos introducidos, se realizan los cálculos necesarios para obtener los parámetros que faltan o que han sido dados de forma indirecta por el fabricante.

Debido a que a la hora de materializar este tipo de proyecto, no es necesaria la compra de material, ya que es un software informático, en el presupuesto solo se hace referencia al coste del cómputo de horas empleadas para su realización junto con los posibles costes indirectos.

14.2 Fases del proyecto

- **Investigación preliminar 7d**
 - Búsqueda de aplicaciones existentes relacionadas con el proyecto ... 3d
 - Definición del alcance y las limitaciones del proyecto 3d
 - Estimación del tiempo disponible para el desarrollo del proyecto..... 1d
- **Requerimientos del sistema 7d**
 - Estudio de lo que el proyecto debe hacer y cómo. 7d
- **Recopilación de información 42d**
 - Comunicaciones aeronáuticas 15d
 - Telecomunicaciones 5d
 - Equipos de comunicaciones utilizados..... 7d
 - Hojas de características de equipos aeronáuticos..... 10d
 - Programación en Matlab 10d
 - Orientación a objetos..... 5d
 - Interfaces gráficas. GUIDE 10d
- **Análisis del sistema..... 12d**
 - Definición de la estructura del proyecto 8d
 - Simulador 4d
 - Equipos..... 4d
 - Estructura de los objetos de programación 2d
- **Diseño del sistema..... 51d**
 - Programación de los objetos del sistema en MATLAB 15d
 - Cálculos de aumento de parámetros 15d
 - Programación de las funciones de cálculo en MATLAB..... 30d
 - Diseño de las interfaces gráficas de equipos en GUIDE..... 15d
 - Diseño de la interfaz gráfica del simulador en GUIDE 15d
 - Unión de las interfaces gráficas con las funciones de cálculo 5d
 - Insertar nuevos equipos 5d
- **Pruebas 8d**
 - Pruebas de funcionamiento del simulador 4d
 - Pruebas de equipos en el simulador 4d
 - Actualizaciones del sistema 4d
- **Documentación 30d**

14.3 Diagrama de GANNT

A continuación se adjunta el diagrama de GANNT del proyecto. Si quiere obtener más detalles, acceda al fichero adjunto en la carpeta del proyecto.

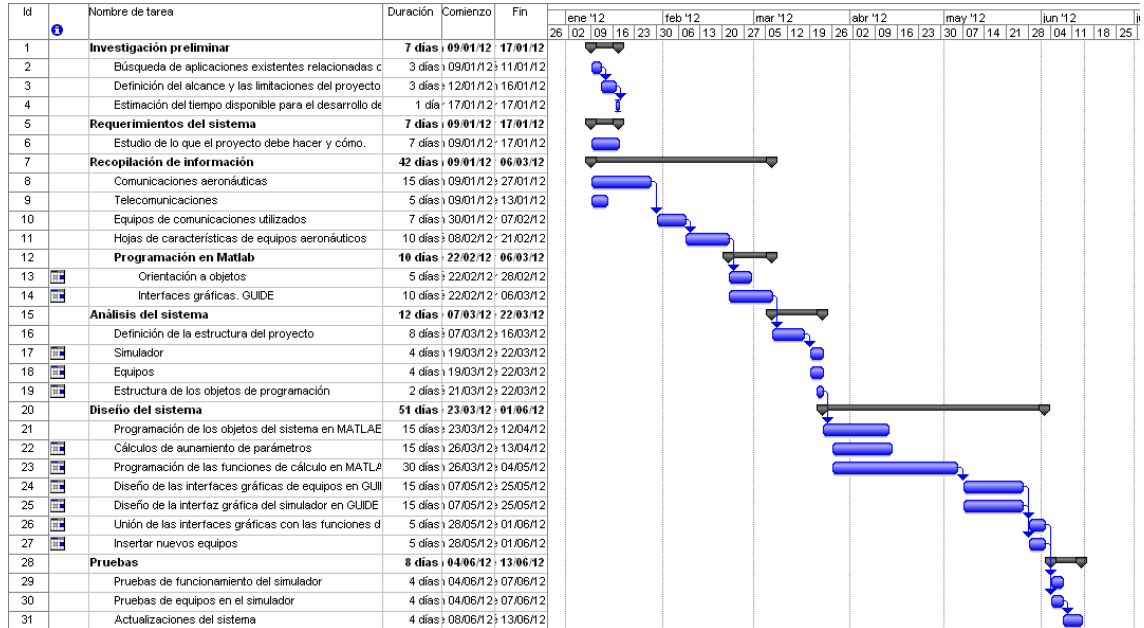


Figura 44. Diagrama de GANNT

14.4 Presupuesto

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Miguel Bravo Arribas

2.- Departamento: Teoría de la señal y comunicaciones

3.- Descripción del Proyecto:

- Título	"Software tool for designing aeronautical communications systems"
- Duración (meses)	6
Tasa de costes Indirectos:	20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

20.414,81 Euros

5.- Desglose presupuestario (costes directos)**PERSONAL**

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a titulo informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes)	Coste hombre mes	Coste (Euro)
Bravo Arribas, Miguel		Ingeniero	1	2.694,39	16.166,34
Hombres mes 1				Total	16.166,34

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
Equipo informático	1.500,00	100	6	60	150,00
Matlab	6.000,00	100	6	60	600,00
		100		60	0,00
		100		60	0,00
		100		60	0,00
					0,00
Total					750,00

CAPÍTULO 14: PRESUPUESTO

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO'

Descripción	Empresa	Costes imputable
Conexión de banda ancha	ONO	96,00
Total		96,00

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	16.166
Amortización	750
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	96
Costes Indirectos	3.402
Total	20.415

“El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de **20.415 Euros**”

Leganés a 15 de Junio de 2012

El ingeniero proyectista

Fdo. Miguel Bravo Arribas

Glosario

ACARS	<i>Aircraft Communications And Reporting System</i>
ARINC	<i>Aeronautical Radio, Incorporated</i>
BD	<i>Base de Datos</i>
BLOS	<i>(Beyond Line of Sight) Más allá de la visión directa</i>
CNAF	<i>Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias</i>
DLNA	<i>Diplexer/Low Noise Amplifier</i>
EbN0	<i>Energy bit to Noise Ratio</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
G/T	<i>Antenna Gain-to-System Noise Temperature Ratio</i>
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HPA	<i>High Power Amplifier</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LOS	<i>(Line of Sight)</i>
MATLAB	<i>MATrixLABoratory</i>
MTBF	<i>(Mean Time Between Failure) Tiempo medio entre fallas</i>
ICAO	<i>International Civil aviation Organization</i>
PEP	<i>(Peak Envelope Power) Potencia de pico de la envolvente</i>
PIRE	<i>Potencia Isotrópica Radiada Equivalente</i>

GLOSARIO

POO	<i>Programación Orientada a Objetos</i>
RFU	<i>Radio Frequency Unit</i>
Rx	<i>Receptor</i>
SATCOM	<i>Satellite Communications</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SINAD	<i>Signal-to-Noise and Distortion ratio</i>
SMA	<i>SubMiniature version A</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SO	<i>Sistema Operativo</i>
Tx	<i>Transmisor</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	<i>Universal Telecommunications Union</i>
VDL	<i>VHF Data Link</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

Bibliografía

17.1.1 Libros

Fortescue, Peter W. **‘Spacecraft systems engineering’** (John Wiley & Sons, 2003, 3^a Ed.)

Austin, Reg **‘Unmanned aircraft systems: UAVs design, development, and deployment’** (John Wiley & Sons, 2010)

Xiong, Fuqin **‘Digital modulation techniques’** (Artech House, 2000)

Cover, T.M. **Elements of information theory** (John Wiley & Sons, 2006, 2^a Ed.)

J. Griffiths. **“Radio Wave Propagation and antennas: an introduction”** (Prentice Hall Int. 1987)

Tomásí,W **‘Sistemas de comunicaciones electrónicas’** (Prentice Hall, 4^a Ed)

Haykin, S. '*An introduction to analog and digital communications*' (John Wiley & Sons, 1989)

FaúndezZanuy, M '*Sistemas de Comunicaciones*' (Marcombo S.A. 2001, 1ªEd)

Constantino, V., Zamanillo, J.M., Sáinz, A., '*Sistemas de Telecomunicación*' (Textos universitarios, 2007)

17.1.2 Páginas o documentos electrónicos en la red

<http://www.boe.es/boe/dias/2009/04/27/pdfs/BOE-A-2009-7021.pdf>, , Accedio en Abril 2012

<http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/Aeronautical.aspx>, Accedio en Junio 2012

<http://www.avionics-intelligence.com/articles/2011/07/model-based-design.html>, , Accedio en Marzo 2012

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963808000205> , Accedio en Febrero 2012

http://www.satkom.cz/download/cvut/AeroBGAN-D3_v10.pdf , Accedio en Abril 2012

http://www2.l-3com.com/csw/product/satcom_airborne/11-global%20hawk%20ics.pdf , Accedio en Febrero 2012

<http://www.key2study.com/66web/acns05.pdf> , Accedio en Enero 2012

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf , Accedio en Abril 2012

<http://www.sinclairtechnologies.com/catalog/resources/pdf/SD214-SF2P4SNM%28D00S-ABK%29-DM.pdf> , Accedio en Marzo 2012

http://www.fasor.com.sv/whitepapers/whitepapers/Whitepapers%20del%202010/Tiempo_medio_entre_fallas_explicacion_y_standares.pdf, Accedio en Marzo 2012

<<http://www.rockwellcollins.com/~media/Files/Unsecure/Products/Product%20Brochures/Communcation%20and%20Networks/Communication%20Radios/VHF-2100%20Data%20Sheet.aspx>, Accedio en Mayo 2012

http://www.selex-comms.com/internet/localization/media/docs/V-UHF_Airborn_Radio_Systems_EN_LR.pdf , Accedio en Febrero 2012

<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.528-3-201202-I/es> , Accedio en Abril 2012

: Bibliografía

<http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.372-9-200708-I!!PDF-E.pdf>,
Accedio en Mayo 2012

<http://www.amphenolrf.com/products/typen.asp?N=0&sid=4FD929802135617F&>,
Accedio en Abril 2012

http://emersonconnectivity.com/OA_MEDIA/catalog/pdf_SSConnectorBrochure.pdf,
Accedio en Abril 2012

<http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/FM.htm> , Accedio en Febrero 2012

<http://www.dsplog.com/2010/07/20/non-coherent-demodulation-of-pi8-d8psk-tetra/>,
Accedio en Marzo 2012

http://www2.rohde-schwarz.com/file_11777/M3AR_bro_en.pdf> , Accedio en Mayo
2012

<http://www.jabanetworks.com/a/aeronautical-satcom-aero/>> , Accedio en Abril 2012

<http://www.aatl.net/publications/vdl4flight-test.htm>> , Accedio en Febrero 2012

<http://www.tapr.org/aprsdoc/ACARS.TXT>> , Accedio en Marzo 2012

Referencias

[1] *Model-based design uses COTS tools for unmanned aerial systems development* Disponible [Internet]: <<http://www.avionics-intelligence.com/articles/2011/07/model-based-design.html>> [15 de Marzo de 2012]

[2] *EDA toolbox for VHF Data Link system simulation* Disponible [Internet]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963808000205> [12 de Febrero de 2012]

[3] *SwiftBroadband Capabilities to Support Aeronautical Safety Services* Disponible [Internet]: http://www.satkom.cz/download/cvut/AeroBGAN-D3_v10.pdf [20 de Abril de 2012]

[4] *Global Hawk – Integrated Communications System* Disponible en [Internet]: http://www.2l-3com.com/csw/product/satcom_airborne/11-global%20hawk%20ics.pdf [22 de Febrero de 2012]

[5] NikosFistas, *Airborne Architectures for SwiftBroadband Services* (European Organisation for the Safety of Air Navigation, 05/06/2006, Ed.1.2)

[6] *HF Communications* Disponible en [Internet]: <http://www.key2study.com/66web/acns05.pdf> [30 de Enero de 2012]

: Referencias

- [7] *Teoría básica de antenas* Disponible en [Internet]: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf [5 de Abril de 2012]]
- [8] *SD214-SF2P4SNM(D00S-ABK)* Disponible en [Internet]: <http://www.sinclairtechnologies.com/catalog/resources/pdf/SD214-SF2P4SNM%28D00S-ABK%29-DM.pdf> [6 de Marzo de 2012]
- [9] *Tiempo medio entre fallas explicación y estándares* Disponible en [Internet]: http://www.fasor.com.sv/whitepapers/whitepapers/Whitepapers%20del%202010/Tiempo_medio_entre_fallas_explicacion_y_standares.pdf [12 de Marzo de 2012]
- [10] Wayne Tomásí '*Sistemas de comunicaicones electrónicas*' (Prentice Hall, 4ª Ed)
- [11] *Transceptor VHF 2100, Rockwell Collins*. Disponible en [Internet]: <http://www.rockwellcollins.com/~media/Files/Unsecure/Products/Product%20Brochures/Communcation%20and%20Networks/Communication%20Radios/VHF-2100%20Data%20Sheet.aspx> [25 de Mayo de 2012]
- [12] *Transceptor U/VHF Airborne Radio System, Sellex*. Disponible en [Internet]: http://www.selex-comms.com/internet/localization/media/docs/V-UHF_Airborn_Radio_Systems_EN_LR.pdf [3 de Febrero de 2012]
- [13] *Curvas de propagación para los servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica que utilizan las bandas de ondas métricas, decimétricas y centimétricas* Disponible en [Internet]: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.528-3-201202-I/es> [7 de Abril de 2012]
- [14] *RecITU-R P.372*, Disponible en [Internet]: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.372-9-200708-I!!PDF-E.pdf> [8 de Mayo de 2012]
- [15] *Type N connectors Amphenol RF*. Disponible en [Internet]: <http://www.amphenolrf.com/products/typen.asp?N=0&sid=4FD929802135617F&> [15 de Abril de 2012]
- [16] *Stainless Steel SMA Connectors Product Catalog*. Disponible en [Internet]: http://emersonconnectivity.com/OA_MEDIA/catalog/pdf_SSConnectorBrochure.pdf [15 de Abril de 2012]
- [17] Marcos FaúndezZanuy , '*Sistemas de Comunicaciones*' (Marcombo S.A. 2001, 1ªEd)
- [18] *FM modulation*, Disponible en [Internet]: <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/FM.htm> [25 de Febrero de 2012]
- [19] *BER plot nonchoerent demodulation*. Disponible en [Internet]: <http://www.dsplot.com/2010/07/20/non-coherent-demodulation-of-pi8-d8psk-tetra/> [12 de Marzo de 2012]

[20] John G.Proakis , **‘Digital Communications’** (Mc Graw Hill, 4^a ed, C7: Channel Capacity and Coding)

[21] *Bandas de frecuencias usadas por rohde Schwarz*, Disponible en [Internet]: <http://www2.rohde-schwarz.com/file_11777/M3AR_bro_en.pdf> [17de Mayo de 2012]

[22] *Aeronautical SATCom Aero*. Disponible en [Internet]: <<http://www.jabanetworks.com/a/aeronautical-satcom-aero/>> [18 de Abril de 2012]

[23] *Advanced Aviation Technology*. Disponible en [Internet]: <<http://www.aatl.net/publications/vdl4flight-test.htm>> [8 de Febrero de 2012]

[24] ACARS. Disponible en [Internet]: <<http://www.tapr.org/aprsdoc/ACARS.TXT>> [15 de Marzo de 2012]

: Anexos

Anexos

Anexo I. Arquitectura de referencia SATCom

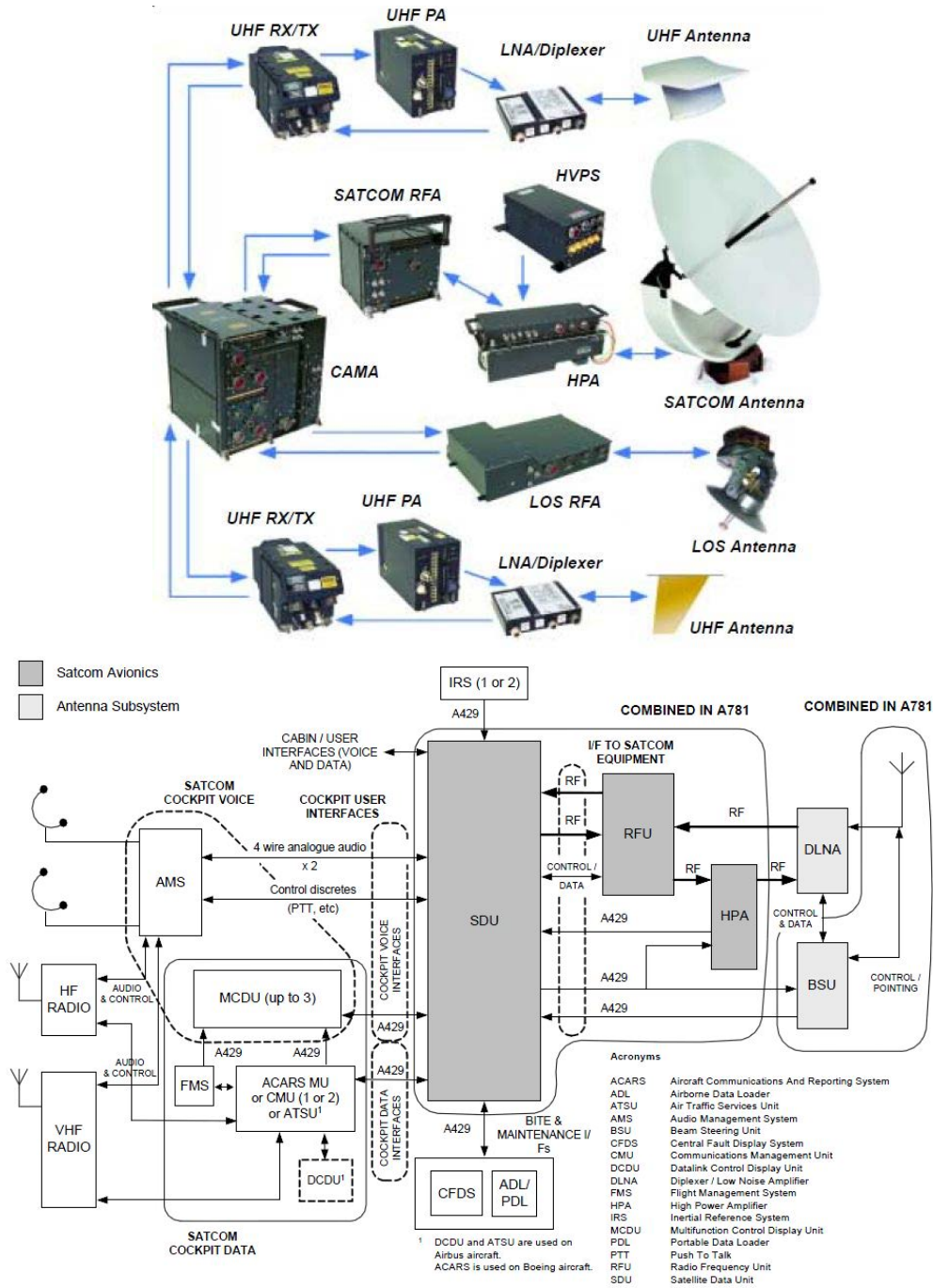


Figura 45. Arquitectura de referencia SATCOM [4]

Anexo II. Consideración sobre la pérdida de los conectores

Conector SMA (SubMiniature version A)

Insertion Loss: (dB maximum)

Straight flexible cable connectors	$0.06\sqrt{f}$ (GHz), tested at 6 GHz
Right angle flexible cable connectors	$0.15\sqrt{f}$ (GHz), tested at 6 GHz
Straight Semi-Rigid cable connectors with contact	$0.03\sqrt{f}$ (GHz), tested at 10 GHz
Straight Semi-Rigid cable connectors w/o contact	$0.03\sqrt{f}$ (GHz), tested at 16 GHz
Uncabled receptacles	N/A

Figura 46. Pérdidas de conector SMA [16]

Este tipo de conector nos va a producir, trabajando a la máxima frecuencia posible que serían los 15 GHz de SATCom unas pérdidas máximas estimadas de:

$$Att = 0.06 * \sqrt{30}(\text{GHz})$$

$$Att_{SMA} = 0.26\text{dB}$$

Conector Tipo N

Type N Specifications	
Electrical	
Impedance	50 Ω
Frequency range	DC - 11 GHz (flexible cable) DC - 18 GHz (semi-rigid)
VSWR	1.3 max. @ DC - 11 GHz (straight) 1.35 max. @ DC - 11 GHz (right-angle)
RF-leakage	90 dB minimum @ 3 GHz
Voltage rating (at sea level)	$\leq 1,500$ V peak (depending on cable)
Contact resistance	center contact: ≤ 1 m Ω outer contact: ≤ 0.2 m Ω
Insulation resistance	5,000 M Ω minimum
Insertion loss maximum	≤ 0.15 dB @ 10 GHz
Dielectric withstanding voltage	2,500 Vrms (at sea level)

Figura 47. Pérdidas de conector tipo N [15]

Este tipo de conector nos va a producir, trabajando a la máxima frecuencia posible que serían los 15 GHz de SATCom unas pérdidas máximas estimadas de:

$$Att_{TypeN} = 0.15 \text{ dB}$$

Con estos datos obtenidos se concluye que para el cálculo del balance de enlace se tendrá en cuenta el peor caso en cuanto a las pérdidas de los conectores se refiere, es decir, se aplicarán unas pérdidas de 0.23 dB por cada conector. Por lo tanto:

	Nº de conectores	Pérdidas / conector (dB)	Pérdidas totales (dB)
Sistema Transmisor	6	0.23	1.58
Sistema Receptor	6	0.23	1.58

Tabla 5. Pérdidas por conectores en el sistema

Anexo II. Modulaciones analógicas

AM

La expresión de una señal modulación AM es [17]

$$s(t) = A_c[1 + k_a m(t)]\cos(2\pi f_c t) \quad [46]$$

Donde visualmente queda como:

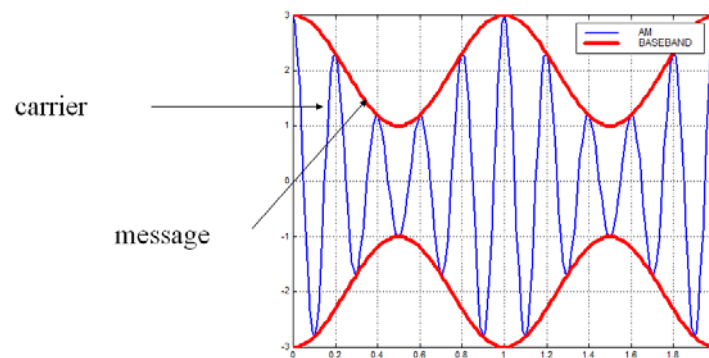


Figura 48. Modulación AM [17]

El índice de modulación de la modulación AM es:

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad [47]$$

SDB-AM

El espectro de una modulación SDB-AM es el que se indica en la siguiente figura:

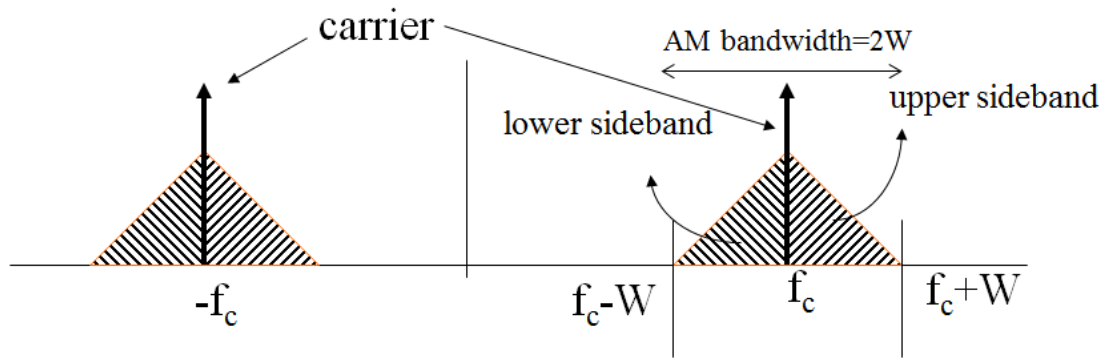


Figura 49. Espectro de la Modulación SDB-AM [17]

La distribución de potencias entre la portadora y las bandas laterales en SDB-AM es:

$$P_T = P_{port} + P_{bandlat} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{m^2}{2} \right] A_c^2 \quad [48]$$

SSB-AM

Distribución de potencias entre portadora y bandas laterales

$$P_T = P_{port} + \frac{m^2 P_c}{2} + \frac{m^2 P_c}{2} \quad [49]$$

Espectro de la modulación SSB-AM

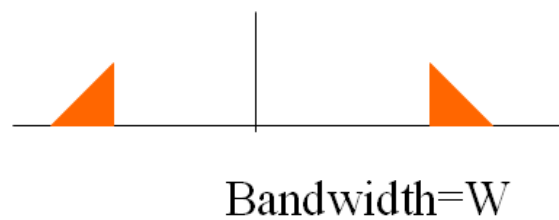


Figura 50. Espectro de la Modulación SSB-AM [17]

En banda lateral única, el ancho de banda utilizado es la mitad que con doble banda lateral.

FM

El ancho de banda de una señal Fm está definido por [18]

$$BW = 2(\beta + 1)f_m \quad [50]$$

Donde:

β : es el índice de modulación

f_m : máxima frecuencia de modulación utilizada

Como es típico en ingeniería, se busca siempre una solución de compromiso entre la eficiencia y el rendimiento. El índice de modulación se limita normalmente a un valor entre 1 y 5, dependiendo de la aplicación [18]

La modulación en frecuencia al proporcionar una protección más robusta que la AM frente a las interferencias, es necesario el uso de anchos de banda de la señal más grandes que AM. Digamos que este es el precio que hay que pagar por esa protección extra de los datos. Gracias a ello la FM proporciona una calidad de audio mayor que la AM.

El problema es que a diferencia de lo que pasa con la AM, con la FM, el aumento de la SNR no es lineal en relación a la potencia de transmisión, es decir, que si yo aumento la potencia de transmisión en 10 dB, la SNR no aumenta 10 dB, ya que existe esta protección extra de los datos de la que se hablaba antes.

Lo que pasa con la FM es que el aumento de la SNR es mayor que el de la AM cuando aumentamos la señal de potencia transmitida, ya que no sufre tanto la existencia de ruido y es más inmune a las interferencias.

Anexo III. Modulaciones digitales

En este anexo se muestran las tablas de relación entre BER y E_b/N_0 usadas en este proyecto para las modulaciones digitales.

D8PSK

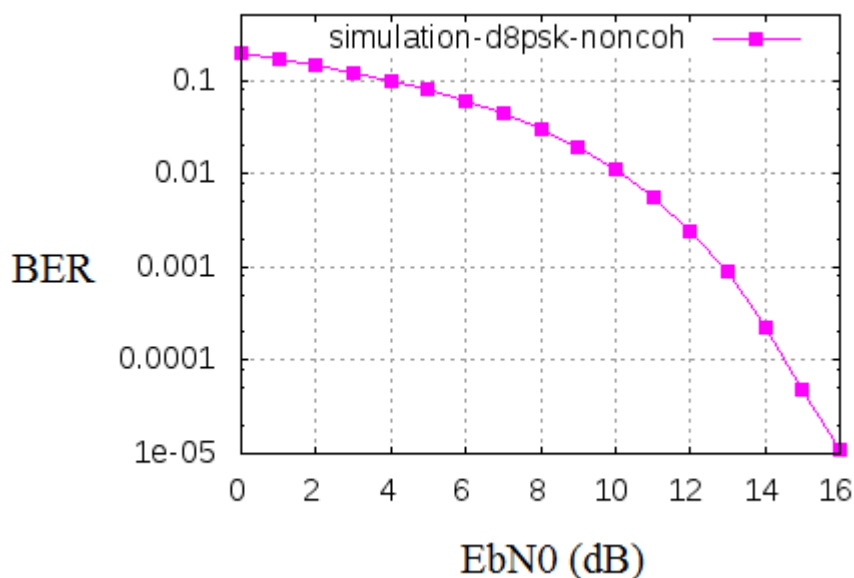


Figura 51. Curva de BER vs E_b/N_0 para una modulación D8PSK [19]

BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK, DQPSK, 4QAM, 16-QAM, 64-QAM

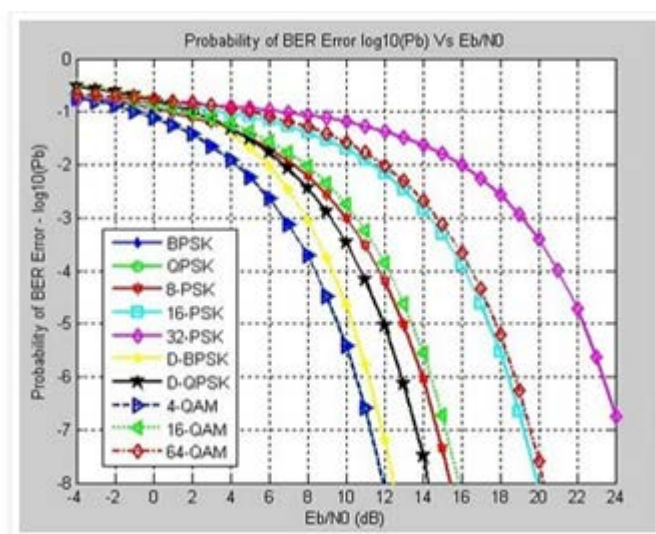


Figura 52. Curva de BER vs E_b/N_0 para las modulaciones BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK, DQPSK, 4QAM, 16-QAM, 64-QAM [20]

Anexo IV. Bandas de frecuencias

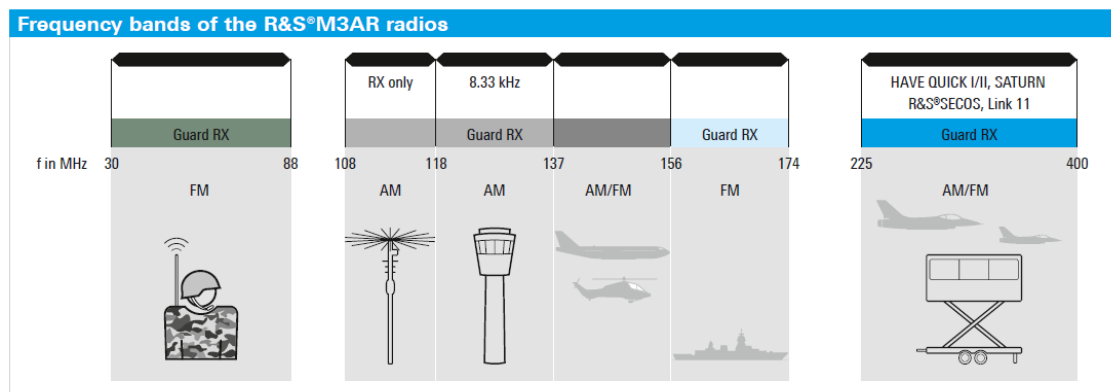


Figura 53. Ejemplo de bandas de frecuencias aeronáuticas [21]

HF (High Frecuencia)

Banda de frecuencias de 3 a 30 MHz.

Comunicaciones aeronáuticas HF

La transmisión de la voz en la banda HF se utiliza para el control de tráfico aéreo en **vuelos de larga distancia**, donde no es posible la comunicación mediante VHF, puesto que utiliza la **refracción ionosférica** como método de propagación,

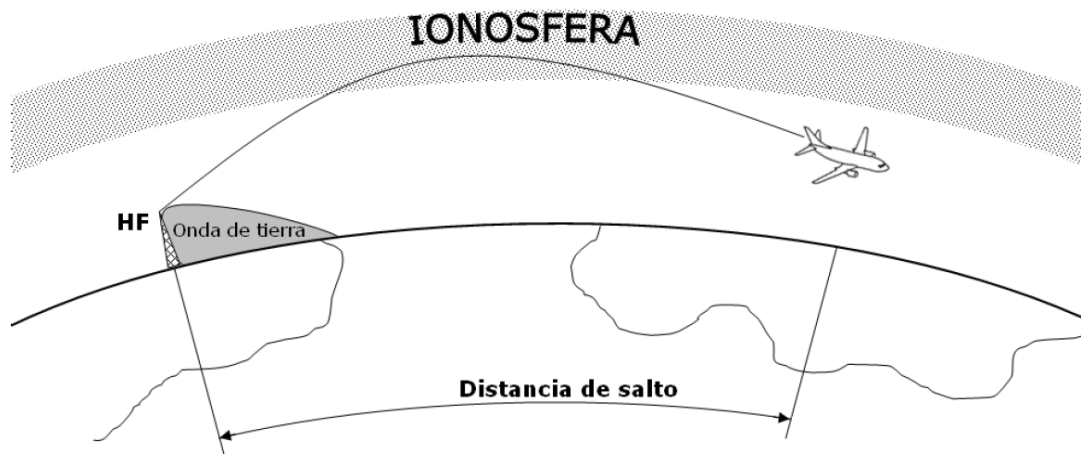


Figura 54. Refracción ionosférica de ondas de HF [21]

Normalmente se utiliza para transmisión de voz en AM

VHF (Very High Frequency)

Banda de frecuencias de 30 a 300MHz .

Estas frecuencias, en comparación con las de la banda HF, presentan una mejor propagación y una mejor calidad en el audio de las comunicaciones, aunque su alcance es mucho menor, pudiendo transmitirse 400Km entre aire y tierra y 1000Km en comunicaciones entre aeronaves.

Comunicación de **voz**:

- 108 a 136.95 MHz
- Canalización de 8.3 KHz o 25 KHz
- AM, FM

Comunicación de **datos**:

- 118 a 137 MHz
- Canalización de 25 KHz
- ACARS: 2400 bps
- VDL-2: 31500 bps
- VDL-4: 19200 bps

UHF (Ultra High Frequency)

Banda de frecuencias de 300MHz a 3GHz.

Actualmente está reservada para los aviones militares y como tal apenas se dispone de información adicional. Además, al ser d la OACI, pues esta organización sólo regula las normas y reglamentos de la aviación civil.

SHF (Super High Frequency) - SATCom

Banda de frecuencias de 3 a 30 GHz.

Conexión de datos, vía satélite, de alta velocidad que ofrece comunicación de voz y datos a velocidades de hasta 256 kilobits por segundo (kbps),

Las frecuencias que se utilizan para la radionavegación aeronáutica son las de 5.1 (Banda C), 10 (Banda Ku), 15.5 GHz (Banda Ku)

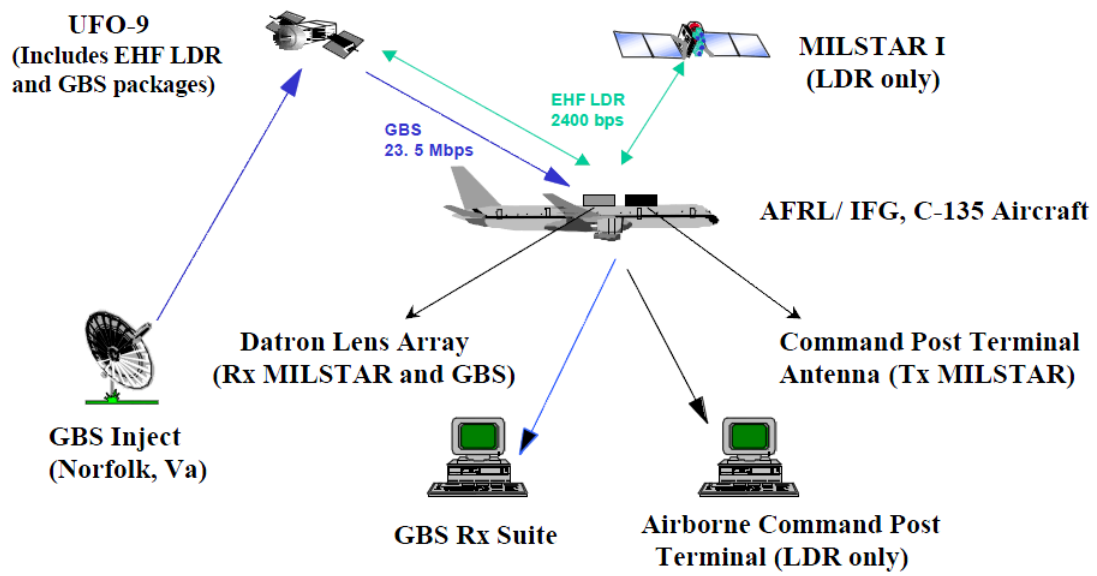


Figura 55.Refracción ionosférica de ondas de HF [22]

Anexo V. Tipos de enlaces de datos

VDL (VHF Data Link)

Es un método de envío de información entre la torre control los aviones. Existen diferentes modos de VDL y cada uno está definido por un tipo de características distinto. A continuación se muestran las características más importantes de cada uno [23]

- **VDL Mode 2**

CSMA
D8PSK
Rb = 31.5 Kbps
Bw = 25 KHz

- **VDL Mode 3**

TDMA
D8PSK
Rb = 31.5 Kbps
Bw = 25 KHz

- **VDL Mode 4**

TDMA
GFSK-GMSK
Rb = 19.2 Kbps
Bw = 25 KHz

ACARS

AM-MSK
Rb = 2400 Kbps

Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) es un enlace digital para la transmisión de mensajes cortos entre los aviones y las estaciones base. Está definido por ARINC 597-5 y usa una modulación AM-MSK con un régimen binario de 2400 bps, típicamente utilizado en la banda de VHF [24]

Anexo VI. Atributos de los objetos programados

En este anexo se definen los atributos de los que se compone cada objeto diseñado en el software. Cada tabla representa a un objeto. El significado de las columnas de las tablas es el que se indica a continuación.

- Atributo: nombre del atributo.
- Unidades: tipo de unidad en la que se almacena el valor en el sistema.
- Descripción: explicación del significado del atributo.

SISTEMAS

Sistema Completo:

Objeto "System"		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Technology	-	Define la tecnología usada en el sistema: HF, VHF, UHF
FrecuencyRange	(Hz)	Frecuencia máxima del sistema. Usada para realizar los cálculos, teniendo en cuenta el peor de los casos.
Link	-	Indica la dirección de la comunicación. Uplink. Ascendente, Torre de Control-Avión Downlink. Descendente, Avión-Torre de Control
LOS		Indica la situación de visibilidad entre ambas partes. LOS, NLOS
Heights	(m)	Diferencia de alturas entre ambas partes del sistema.A(15-1000),C(15-10000),E(15-20000)
CommunicationType	-	Indica lo que se quiere transmitir en la comunicación. Voz, datos
Distance	(m)	Distancia longitudinal entre ambas partes del sistema
EIRP	(dBW)	Potencia radiada isotrópica equivalente
PathLosses	(dB)	Pérdidas de enlace del sistema
SNR	(dB)	Relación señal a ruido del sistema
EbN0	(dB)	Energía por bit entre d.e.p de ruido del sistema
BER	(unidades naturales)	Ratio de error de bit del sistema
TxSystem	-	Bloque transmisor del sistema
RxSystem	-	Bloque receptor del sistema

Tabla 6. Atributos del objeto "System"

Sistema transmisor:

Objeto "TxSystem"		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Transmitter	-	Representa al equipo transmisor
Wire	-	Representa al cable usado en el sistema transmisor
HPA	-	Representa al equipo amplificador de alta potencia del sistema transmisor
Duplexer	-	Representa al equipo duplexor del sistema transmisor
Antenna	-	Representa a la antena del sistema transmisor
EIRP	(dBW)	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente generada por el conjunto del sistema transmisor
Height	(m)	Altura con respecto al suelo a la que se encuentra el sistema transmisor
Weight	(Kg)	Suma de todos los pesos de los equipos que componen el sistema transmisor

Tabla 7. Atributos el objeto "TxSystem"

Sistema receptor:

Objeto "RxSystem"		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Receiver	-	Representa al equipo receptor
Wire	-	Representa al cable usado en el sistema receptor
HPA	-	Representa al equipo amplificador de alta potencia del sistema receptor
Duplexer	-	Representa al equipo duplexor del sistema receptor
Antenna	-	Representa a la antena del sistema receptor
NoiseFigure	(dB)	Figura de Ruido (F) total debido al conjunto de equipos del sistema receptor completo.
Height	(m)	Altura con respecto al suelo a la que se encuentra el sistema receptor
Weight	(Kg)	Suma de todos los pesos de los equipos que componen el sistema receptor

Tabla 8. Atributos del objeto RxSystem

EQUIPOS

Equipo transceptor:

Objeto "Transceiver"		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Características generales		
DeviceType	-	Tipo de dispositivo (Transceiver)
Location	-	Localización del equipo (embarcado o terreno)
Company	-	Empresa fabricante del transceptor
Name	-	Nombre del transceptor
Technology	-	Define la tecnología usada en el sistema: HF, VHF, UHF, SATCom
Especificaciones eléctricas		
FrecuencyRange	(Hz)	Frecuencia máxima del sistema. Usada para realizar los cálculos, teniendo en cuenta el peor de los casos.
FrecuencyMin	(Hz)	Frecuencia mínima de funcionamiento del equipo
FrecuencyMax	(Hz)	Frecuencia máxima de funcionamiento del equipo
Generales		
Voz		
ModulationType_Voice	-	Tipo de modulación para transmisión/recepción de voz
ModulationIndex_Voice	(unidades naturales)	Índice de modulación de la voz (para modulaciones analógicas)
BitRate_Voice	(bps)	Régimen binario para transmisión de voz (para modulaciones digitales)
SignalBandwidth_Voice	(Hz)	Ancho de banda usado para la transmisión/recepción de voz
Datos		
ModulationType_Data		Tipo de modulación para transmisión/recepción de datos
BitRate_Data	(bps)	Régimen binario para transmisión de datos
SignalBandwidth_Data	(Hz)	Ancho de banda usado para la transmisión/recepción de datos
Equipo transmisor		
Impedance_Tx	(Hz)	Impedancia del equipo transmisor
Voz		
TxPower_Voice	(W)	Potencia de transmisión para voz
Distorsion_Tx_Voice	(unidades naturales)	Distorsión existente a la hora de transmitir voz
ModulationLevel_Tx_Voice	(unidades naturales)	Nivel de modulación usado para transmitir voz
Datos		
Distorsion_Tx_Data	(unidades naturales)	Distorsión existente a la hora de transmitir datos

TxPower_Data	(W)	Potencia de transmisión para datos
ModulationLevel_Tx_Data	(unidades naturales)	Nivel de modulación usado para transmitir datos
Equipo receptor		
Impedance_Rx	(Ω)	Impedancia del equipo receptor
Voz		
SINAD_Rx_Voice	(dB)	Relación de SINAD del receptor para voz
S_N_N_Rx_Voice	(dB)	Relación S+N/N del receptor para voz
Voltage_Rx_Voice	(V)	Tensión aplicada para obtener unos parámetros de sensibilidad dados en el receptor para voz
Sensitivity_Rx_Voice	(dBm)	Sensibilidad del equipo receptor para voz
NoiseFigure_Rx_Voice	(dB)	Figura de ruido del receptor para voz
BER_Rx_Voice	(unidades naturales)	Tasa de error de bit del receptor para voz
Distorsion_Rx_Voice	(unidades naturales)	Distorsión existente en el receptor para voz
DynamicRange_Rx_Voice	(unidades naturales)	Rango dinámico del receptor para voz
EbN0_Rx_Voice	(dB)	Energía de bit sobre potencia de ruido rel receptor para voz
SNR_Rx_Voice	(dB)	SNR del receptor para voz
Datos		
Voltage_Rx_Data	(V)	Tensión aplicada para obtener unos parámetros de sensibilidad dados en el receptor para datos
Sensitivity_Rx_Data	(dBm)	Sensibilidad del equipo receptor para datos
NoiseFigure_Rx_Data	(dB)	Figura de ruido del receptor para datos
BER_Rx_Data	(unidades naturales)	Tasa de error de bit del receptor para datos
Distorsion_Rx_Data	(unidades naturales)	Distorsión existente en el receptor para datos
DynamicRange_Rx_Data	(unidades naturales)	Rango dinámico del receptor para datos
EbN0_Rx_Data	(dB)	Energía de bit sobre potencia de ruido rel receptor para datos
SNR_Rx_Data	(dB)	SNR del receptor para datos
Especificaciones mecánicas		
Depth	(cm)	Profundidad del transceptor
Height	(cm)	Altura del transceptor
Width	(cm)	Anchura del transceptor
Weight	(Kg)	Peso del transceptor
Connector	-	
Especificaciones ambientales		
TemperatureMin	(°C)	Temperatura mínima límite a la que puede estar el transceptor para funcionar correctamente
TemperatureMax	(°C)	Temperatura máxima límite a la que puede estar el transceptor para funcionar

		correctamente
AltitudeMax	(m)	Altitud maximalímite a la que puede estar el transceptor para funcionar correctamente
Especificaciones de operación		
MTBF	(h)	Tiempo medio de operación sin que el equipo produzca fallos

Tabla 9. Atributos del objeto “Transceiver”

Cable:

Objeto “Wire”		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Características generales	-	
DeviceType	-	Tipo de dispositivo (Wire)
WireType	-	Tipo de cable (Coaxial...)
Company	-	Empresa fabricante
Name	-	Nombre comercial del cable
Distance	(m)	Longitud del cable
Especificaciones eléctricas		
FrecuencyMin	(Hz)	Frecuencia mínima de operación
FrecuencyMax	(Hz)	Frecuencia máxima de operación
Impedance	(Ω)	Impedancia
CapacitanceMax	(pF)	Capacitancia máxima
Att_Frec1	(Hz)	Frecuencia 1 para definir la atenuación
Att_Frec2	(Hz)	Frecuencia 2 para definir la atenuación
Att_Frec3	(Hz)	Frecuencia 3 para definir la atenuación
Att_Frec4	(Hz)	Frecuencia 4 para definir la atenuación
Att_Nom1	(dB)	Atenuación nominal que se produce a la frecuencia 1
Att_Nom2	(dB)	Atenuación nominal que se produce a la frecuencia 2
Att_Nom3	(dB)	Atenuación nominal que se produce a la frecuencia 3
Att_Nom4	(dB)	Atenuación nominal que se produce a la frecuencia 4
Att_Max1	(dB)	Atenuación máxima que se produce a la frecuencia 1
Att_Max2	(dB)	Atenuación máxima que se produce a la frecuencia 2
Att_Max3	(dB)	Atenuación máxima que se produce a la frecuencia 3
Att_Max4	(dB)	Atenuación máxima que se produce a la frecuencia 4
AttTotal	(dB)	Atenuación total sufrida debido a la

		frecuencia de operación y a la longitud del cable
Especificaciones mecánicas		
OuterDiameterMax	(mm)	Diámetro exterior máximo
OuterDiameterNom	(mm)	Diámetro exterior nominal
WeightMax	(Kg)	Peso máximo del cable
WeightNom	(Kg)	Peso nominal del cable
WeightTotal	(Kg)	Peso total del cable teniendo en cuenta su longitud máxima
Especificaciones ambientales		
TemperatureMin	(°C)	Temperatura máxima límite a la que puede estar el cable para funcionar correctamente
TemperatureMax	(°C)	Altitud maxima límite a la que puede estar el cable para funcionar correctamente
AltitudeMax	(m)	altura máxima límite a la que puede estar el cable para funcionar correctamente

Tabla 10. Atributos del objeto “Wire”

Duplexor:

Objeto “Wire”		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Características generales		
DeviceType	-	Tipo de dispositivo (Duplexer)
Location	-	Localización del duplexor(embarcado, terreno)
Company	-	Empresa fabricante
Name	-	Nombre comercial del duplexor
Technology	-	Define la tecnología usada por el duplexor: HF, VHF, UHF, SATCom
Especificaciones eléctricas		
FrecuencyRange	(Hz)	Frecuencia máxima del sistema. Usada para realizar los cálculos, teniendo en cuenta el peor de los casos.
FrecuencyMin	(Hz)	Frecuencia mínima de operación
FrecuencyMax	(Hz)	Frecuencia máxima de operación
Impedance	(Ω)	Impedancia
Gain_Trx2Antenna	(dB)	Ganancia que ofrece el duplexor en sentido de transmisor a antena
Gain_Antenna2Rx	(dB)	Ganancia que ofrece el duplexor en sentido de antena a receptor
GainTolerance	(dB)	Tolerancia o margen de variación de la ganancia ofrecida
Losses_Trx2Antenna	(dB)	Pérdidas de potencia que produce el duplexor en sentido de transmisor a antena

Losses_Antenna2Rx	(dB)	Pérdidas de potencia que produce el duplexor en sentido de antena a receptor
S11	(dB)	Parámetro que indica la cantidad de potencia que refleja el puerto 1 al entrar por el puerto 1 del equipo
NoiseFigure	(dB)	Figura de ruido del duplexor
Especificaciones mecánicas		
Depth	(cm)	Profundidad del duplexor
Height	(cm)	Altura del duplexor
Width	(cm)	Anchura del duplexor
Weight	(Kg)	Peso del duplexor
Connector	(-/-)	Conectores utilizados (In/Out)
Especificaciones de operación		
MTBF	(h)	Tiempo medio de operación sin que el equipo produzca fallos
Environmental specifications		
TemperatureMin	(°C)	Temperatura máxima límite a la que puede estar el duplexor para funcionar correctamente
TemperatureMax	(°C)	Altitud máxima límite a la que puede estar el duplexor para funcionar correctamente
AltitudeMax	(m)	altura máxima límite a la que puede estar el duplexor para funcionar correctamente

Tabla 11. Atributos del objeto “Duplexer”

HPA:

Objeto “Wire”		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Características generales		
DeviceType	-	Tipo de dispositivo (HPA)
Location	-	Localización del HPA (embarcado, terreno)
Company	-	Empresa fabricante
Name	-	Nombre comercial del HPA
Technology	-	Define la tecnología utilizada por el HPA: HF, VHF, UHF, SATCom
Especificaciones ambientales		
FrecuencyRange	(Hz)	Frecuencia máxima del sistema. Usada para realizar los cálculos, teniendo en cuenta el peor de los casos.
FrecuencyMin	(Hz)	Frecuencia mínima de operación
FrecuencyMax	(Hz)	Frecuencia máxima de operación
PowerConsumption	(W)	Impedancia
Impedance	(Ω)	Impedancia
Gain	(dB)	Ganancia ofrecida por el HPA
GainTolerance	(dB)	Tolerancia o margen de variación de la ganancia ofrecida
NoiseFigure	(dB)	Figura de ruido del HPA
Especificaciones mecánicas		

Depth	(cm)	Profundidad del HPA
Height	(cm)	Altura del HPA
Width	(cm)	Anchura del HPA
Weight	(Kg)	Peso del HPA
Connector	(-/-)	Conectores utilizados (In/Out)
Especificaciones de operación		
MTBF	(h)	Tiempo medio de operación sin que el equipo produzca fallos
Especificaciones ambientales		
TemperatureMin	(°C)	Temperatura máxima límite a la que puede estar el HPA para funcionar correctamente
TemperatureMax	(°C)	Altitud maxima límite a la que puede estar el HPA para funcionar correctamente
AltitudeMax	(m)	altura máxima límite a la que puede estar el HPA para funcionar correctamente

Tabla 12. Atributos del objeto “HPA”

Antena:

Objeto “Wire”		
ATRIBUTO	(UNIDADES)	Descripción
Características generales		
DeviceType	-	Tipo de dispositivo (Antenna)
Type	-	Localización la antena (embarcada, terrena)
Location	-	Empresa fabricante
Company	-	Nombre comercial de la antena
Name	-	Define la tecnología utilizada por el equipo: HF, VHF, UHF, SATCom
Technology	-	Tipo de dispositivo (HPA)
Especificaciones eléctricas		
FrecuencyRange	(Hz)	Frecuencia máxima del sistema. Usada para realizar los cálculos, teniendo en cuenta el peor de los casos.
FrecuencyMin	(Hz)	Frecuencia mínima de operación
FrecuencyMax	(Hz)	Frecuencia máxima de operación
Impedance	(Ω)	Impedancia
G_T	(dB/K)	Figura de mérito de la antena
Gain_Tx	(dB)	Ganancia ofrecida por la antena a la hora de transmitir
Gain_Rx	(dB)	Ganancia ofrecida por la antena a la hora de recibir
GainTolerance	(dB)	Tolerancia o margen de variación de la ganancia ofrecida
Losses_Tx	(dB)	Pérdidas introducidas por la antena a la hora de transmitir
Losses_Rx	(dB)	Pérdidas introducidas por la antena a la

		hora de transmitir
EquivalentTemperature	(K)	Temperatura de ruido equivalente de la antena. Depende de la frecuencia a la que se esté trabajando
Polarization	-	Tipo de polarización de la antena
RadiationPattern;	-	Tipo de diagrama de radiación de la antena
Especificacionesmecánicas		
Depth	(cm)	Profundidad del duplexor
Height	(cm)	Altura del duplexor
Width	(cm)	Anchura del duplexor
Weight	(Kg)	Peso del duplexor
Diameter	(m)	Diámetro de la antena (usado en antenas parabólicas)
Connector	(-/-)	Conectores utilizados (In/Out)
Especificaciones de operación		
MTBF	(h)	Tiempo medio de operación sin que el equipo produzca fallos
Especificaciones ambientales		
TemperatureMin	(°C)	Temperatura máxima límite a la que puede estar la antena para funcionar correctamente
TemperatureMax	(°C)	Altitud maxima límite a la que puede estar la antena para funcionar correctamente
AltitudeMax	(m)	altura máxima límite a la que puede estar la antena para funcionar correctamente

Tabla 13. Atributos del objeto "Antenna"